

# **Triboelektrische Aufladung von Kunststoffen**

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik  
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor - Ingenieur

Dr.-Ing.

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Ernő Németh

geboren am 27.07.1968 in Orosháza / Ungarn

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Gert Schubert, Freiberg

Prof. Dr. rer. nat. Michael Stoll, Freiberg

Prof. Dr. habil. Barnabás Csőke, Miskolc

Tag der Verleihung: 14.11.2003

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1998 bis 2002 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

Hiermit möchte ich mich bei meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gert Schubert für die vielen wertvollen Hinweise, Anregungen und Diskussionen recht herzlich bedanken.

Für den Aufbau, Umbau und Instandhaltung der Versuchseinrichtungen sowie für die Unterstützung der Durchführung der Experimente danke ich Herrn Wolfgang Liebschner.

Herrn Dr. Frank Simon, Frau Dr. Victoria Albrecht und Herrn Dipl.-Phys. Andreas Janke danke ich für die kooperative Zusammenarbeit und für die Bereitschaft, die im Institut für Polymerforschung Dresden zur Charakterisierung der Kunststoffoberfläche gewonnen Ergebnisse zur Verfügung zu stellen, die in besonderem Maße zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Bei Herrn Dr. André Kamptner bedanke ich mich für die Unterstützung beim Aufbau der Versuchs- und Messeinrichtungen sowie für die hilfreichen Anregungen.

Mein herzlicher Dank gilt allen Mitarbeitern des Institutes für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik für ihr freundliches Entgegenkommen bei auftretenden Fragenstellungen.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Silke für ihr Verständnis und für ihre ständige Unterstützung während des gesamten Bearbeitungszeitraumes.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die Finanzierung der Forschungsarbeit im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 285 „Partikelwechselwirkungen bei Prozessen der Mechanischen Verfahrenstechnik“.

Ernő Németh

**Inhaltsverzeichnis**

Seite

<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>5</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>9</b>
<b>2 Stand der Forschung zur triboelektrischen Aufladung von Festkörpern.....</b>	<b>11</b>
2.1 Energiebändermodell.....	11
2.2 Modellvorstellungen zur Kunststoffaufladung.....	15
2.2.1 Elektronentransport-Theorie.....	16
2.2.2 Ionentransport-Theorie.....	21
2.3 Triboelektrische Reihe und chemische Struktur.....	22
2.4 Aufladungsverhalten und Säure-Base-Eigenschaften.....	23
2.5 Einflussfaktoren auf die triboelektrische Aufladung.....	25
2.5.1 Elektrische Eigenschaften.....	25
2.5.2 Atmosphärische Bedingungen.....	26
2.5.3 Gasentladungen.....	29
2.5.4 Kontaktierungsbedingungen.....	31
2.5.5 Modifizierung der Oberfläche.....	33
<b>3 Versuchsmaterialien.....</b>	<b>34</b>
<b>4 Charakterisierung der Kunststoffoberfläche.....</b>	<b>37</b>
4.1 Chemische Zusammensetzung.....	37
4.2 Wasserdampfadsorption.....	39
4.3 Oberflächenwiderstand.....	42
4.4 Verhalten von elektrischen Ladungen auf Kunststoffoberflächen.....	48
4.5 Lewis-Säure-Base-Eigenschaften.....	52
<b>5 Versuchsdurchführung, Methodik der Versuchsauswertung und Fehlerbetrachtung.....</b>	<b>54</b>
5.1 Versuchsstand.....	54

<b>5.2</b>	<b>Versuchsdurchführung.....</b>	<b>59</b>
<b>5.3</b>	<b>Methodik der Versuchsauswertung.....</b>	<b>65</b>
<b>5.4</b>	<b>Fehlerbetrachtung.....</b>	<b>68</b>
<b>6</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>73</b>
<b>6.1</b>	<b>Vorgänge in der Wirbelschicht.....</b>	<b>73</b>
<b>6.2</b>	<b>Aufladung nur eines Kunststoffes in der Wirbelkammer.....</b>	<b>77</b>
6.2.1	Aufladung eines einzelnen Kunststoffes in der Wirbelkammer mit artgleicher Kunststoffwand.....	77
6.2.1.1	Einfluss der Aufladungsdauer.....	77
6.2.1.2	Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit.....	85
6.2.2	Aufladung eines einzelnen Kunststoffes in der Wirbelkammer mit Metallwand.....	88
6.2.2.1	Einfluss der Aufladungsdauer.....	88
6.2.2.2	Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit.....	94
6.2.2.3	Einfluss der Metallart der Wandung der Wirbelkammer.....	96
6.2.2.4	Einfluss der wirksamen Kontaktfläche der Metallwandung.....	99
6.2.2.5	Einfluss der Zusammensetzung der Kunststoffe.....	99
<b>6.3</b>	<b>Aufladung von Zweikomponenten-Gemischen.....</b>	<b>101</b>
<b>6.4</b>	<b>Aufladung von Mehrkomponenten-Gemischen.....</b>	<b>105</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für weiterführende Arbeiten.....</b>	<b>111</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>115</b>
	<b>Anlagen.....</b>	<b>126</b>

# Symbolverzeichnis

A	Kontaktfläche; Anströmfläche einer Partikel
A <sub>p</sub>	Oberfläche einer Partikel
A <sub>Sch</sub>	Oberfläche einer Schüttung
ABF	Aminobenzodifuranon
Ar	Archimedes-Zahl
ASF	Adsorption solvatochromer Farbstoffe
ΔA <sub>p</sub>	Fehler bei Bestimmung der Oberfläche einer Partikel
Be	Beranek-Zahl
c <sub>w</sub>	Widerstandsbeiwert
C	Kapazität eines Kondensators
d	Durchmesser
d <sub>A</sub>	Durchmesser zu w <sub>A</sub>
d <sub>L</sub>	Durchmesser zu w <sub>L</sub>
d <sub>max</sub>	maximaler Durchmesser
d <sub>s,A</sub>	spezifischer oberflächenäquivalenter Kugeldurchmesser
d <sub>v</sub>	volumenäquivalenter Kugeldurchmesser
D	Durchmesser
DCE	1,2-Dichlorethan
e	elektrische Elementarladung: $1,602 \cdot 10^{-19}$ C
E	elektrische Feldstärke
E <sub>A</sub>	Energieniveau der Akzeptorzustände
E <sub>B</sub>	Bindungsenergie
E <sub>D</sub>	Durchbruchsfeldstärke
E <sub>D</sub>	Energieniveau der Donatorzustände
E <sub>F</sub>	Fermi-Niveau
ΔE <sub>G</sub>	Breite der verbotenen Zone
E <sub>kin</sub>	kinetische Energie
E <sub>V</sub>	Vakuum-Niveau
EFGI	Electric Field Gradient Imaging
EFM	Electric Force Microscopy
FE	Dicyano-bis(1, 10-phenantrolin)eisen(II)
g	Erdbeschleunigung: 9,81 m/s <sup>2</sup>
g	Elektrodenabstand
G	Bedeckungsgrad
h	Rückprallwahrscheinlichkeit
h	Planck-Konstante: $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js
H	Spritzkornanteil
I	elektrischer Strom
I <sub>res</sub>	resultierender Strom

---

$I_C$	Strom für die kapazitive Aufladung der Elektrodenanordnung
$I_H$	Hintergrundstrom
$I_R$	Strom, der an der Kunststoffoberfläche fließt
$K$	Geometriefaktor einer Elektrode
$l$	Länge
$L$	Leiterband
$m$	Masse
$\Delta m$	Fehler bei Bestimmung der Masse
$MK$	Michler's Keton
$n$	Anzahl der Messwerte
$n$	Anzahl der Komponenten in einem Gemisch
$p$	Druck
$p_L$	Luftdruck
$p_s$	Sättigungsdruck
$\Delta p_N$	Polaritätsparameter-Differenz
$P$	statistische Sicherheit
$P_{k,i}$	Anteil der Kontaktanzahl der Komponenten $k$ mit Komponenten $i$
$PC$	Personal Computer
$Q$	elektrische Ladung
$Q_+$	positive elektrische Ladung
$Q_-$	negative elektrische Ladung
$\Delta Q$	Fehler der Ladungsmessung
$Re$	Reynolds-Zahl
$Re_A$	Reynolds-Zahl am Austragspunkt
$Re_L$	Reynolds-Zahl am Lockerungspunkt
$R_{O,A}$	Oberflächenwiderstand
$s$	Abstand
$s$	Standardabweichung
$S_m$	spezifische Oberfläche
$SPI$	Surface Potential Imaging
$t$	Faktor zum Vertrauensbereich des Mittelwertes
$t$	Zeit
$t$	Temperatur
$t_A$	Aufladungszeit
$t_{90}$	Aufladungszeit bei 90 %-Wert von $\sigma_{max}$
$TER$	Triboelektrische Reihe
$U$	elektrischer Spannung
$U_K$	Kontaktpotenzial
$\bar{x}$	Mittelwert
$\Delta \bar{x}$	Vertrauensbereich des Mittelwertes
$XPS$	Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie
$V$	Valenzband
$V_P$	Partikelvolumen

$w$	Geschwindigkeit
$w_A$	Strömungsgeschwindigkeit der Luft am Austragspunkt
$w_L$	Strömungsgeschwindigkeit der Luft am Lockerungspunkt
$w_Q$	Aufladungsgeschwindigkeit
$w_{st}$	stationäre Sinkgeschwindigkeit
$\alpha$	Lewis-Säure-Polaritätsparameter
$\beta$	Lewis-Base-Polaritätsparameter
$\Delta$	Ellipsometriewinkel
$\varepsilon$	Porosität
$\varepsilon_0$	elektrische Feldkonstante
$\varepsilon_L$	Porosität am Lockerungspunkt
$\varepsilon_r$	Permittivitätszahl
$\xi_p$	Widerstandsfunktion nach Ergun
$\lambda$	Penetrationstiefe
$\lambda$	Wellenlänge
$\nu$	Wellenzahl
$\nu_L$	Kinematische Viskosität der Luft
$\nu_{max}$	Wellenzahl beim Intensitätsmaximum des Adsorptionsspektrums
$\rho_L$	Dichte der Luft
$\rho_M$	Dichte des Mediums
$\rho_P$	Partikeldichte
$\rho_s$	spezifischer Oberflächenwiderstand
$\sigma$	Flächenladungsdichte
$\sigma_+$	positive Flächenladungsdichte
$\sigma_-$	negative Flächenladungsdichte
$\sigma_{max}$	maximale Flächenladungsdichte
$\Delta\sigma$	maximaler Fehler
$\varphi$	relative Luftfeuchtigkeit
$\Phi$	Elektronenaustrittsarbeit
$\Phi$	Inzidenzwinkel
$\Phi_{HL}$	Elektronenaustrittsarbeit eines Halbleiters
$\Phi_{KS}$	Elektronenaustrittsarbeit eines Kunststoffes
$\Phi_M$	Elektronenaustrittsarbeit eines Metalls
$\Phi_{Rück}$	Rückprallwahrscheinlichkeit
$\Psi$	Sphärizität nach Waddel
$\Psi$	Ellipsometriewinkel

### Kurzzeichen der Kunststoffe

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
CA	Celluloseacetat
CN	Cellulosenitrat
HDPE	Polyethylen hoher Dichte
LDPE	Polyethylen niedriger Dichte
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PB	Polybuten
PC	Polycarbonat
PDP	Polydiallylphthalat
PE	Polyethylen
PEEK	Polyaryletherketon
PEI	Polyetherimid
PEO	Polyethylenoxid
PET	Polyethylentheraphthalat
PF	Phenol-Formaldehyd
PI	Polyimid
PMMA	Polymethylmethacrylat
PMP	Poly-4-methylpenten-1
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan
PVAL	Polyvinylalkohol
PVB	Polyvinylbutyral
PVC	Polyvinylchlorid
PVDC	Polyvinylidenchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PVP	Polyvinylpyrrolidon
RUC	Chlorkautschuk
SAN	Styrol-Acrylnitril
SB	Styrol-Butadien
UP	ungesättigter Polyester



# 1 Einleitung

Die triboelektrische Aufladung von Festkörpern ist seit langer Zeit ein bekanntes Phänomen. Sie hat neben der Elektrosortierung [1 bis 9] in vielen weiteren technischen Prozessen – wie z. B. Elektrophotographie [10], Staubabscheidung [11, 12], Kunststoffbeschichtung [13] – Anwendung gefunden. Trotz intensiver Forschungsarbeiten im letzten Jahrhundert sind jedoch noch zahlreiche Fragen der Triboaufladung von Kunststoffen offen. Bislang existiert keine allgemeingültige Erklärung für dieses Phänomen. Einerseits wird sie durch eine ungenügende Reproduzierbarkeit der Versuche erschwert. Dies liegt vermutlich an den unterschiedlichen Kontaktierungsbedingungen der Probekörper und an der Verwendung nicht identischer Kunststoffe verschiedener Forscher. Andererseits sind die erhaltenen Ergebnisse oft widersprüchlich, was mit den noch nicht eindeutig identifizierten, für die Aufladung verantwortlichen Ladungsträgern zusammenhängen dürfte.

Die bisher noch nicht ausreichenden Kenntnisse zum Aufladungsvorgang der Kunststoffe haben dazu geführt, dass mittels Elektrosortierung im Wesentlichen nur Zweikomponenten-Gemische technisch getrennt wurden.

Bei der Trennung triboelektrisch aufgeladener Kunststoffe mittels Elektrosortierung handelt es sich um einen trocken arbeitenden Sortierprozess. Bezüglich des geringen spezifischen Energieverbrauchs stellt dies einen wesentlichen Vorteil gegenüber anderen Sortierprozessen – wie Dichtesortierung, Flotation oder Trennung nach thermoadhäsiven Eigenschaften – dar. Anhand der stoffspezifischen triboelektrischen Aufladung der Kunststoffe können auch Gemische mit ähnlicher Dichte der Komponenten (z. B. PE/PP-Gemisch) getrennt werden [1, 3]. Als Nachteil dieses Prozesses haben sich die Verunreinigungen und diverse Additive der Kunststoffe erwiesen, die das ursprüngliche Aufladungsverfahren wesentlich verändern können [2, 7].

Für eine erfolgreiche Trennung von Kunststoffgemischen im elektrostatischen Feld ist eine hohe und selektive Aufladung der Gemischkomponenten erforderlich. Dies gelingt jedoch meist nur dann, wenn die auf die Trennung wirkenden Einflussparameter – wie z. B. relative Luftfeuchtigkeit, Aufladungszeit, Kontaktierungsstärke – entsprechend gewährleistet sind [4, 5, 6]. Auch eine Vorbehandlung mit oberflächenaktiven Substanzen kann das Aufladungsverhalten stark beeinflussen [14].

Zwar liegen die ersten Versuche, Kunststoffe mittels Elektrosortierung zu trennen, schon Jahrzehnte zurück, doch hat dieser Prozess in der Industrie für die Kunststofftrennung noch keine breite Anwendung gefunden. Ein Grund dafür ist in den bislang nur teilweise aufgeklärten Vorgängen bei der triboelektrischen Aufladung von Kunststoffen zu suchen. In nur wenigen dieser Untersuchungen wurde angestrebt, die erzielten Ergebnisse auf wissenschaftlicher Grundlage zu erklären [14, 15].

Eine Voraussage für die Ladungshöhe und für die Polarität der Gemischkomponenten ist z. Z. noch nicht möglich, da bislang kein umfassendes Modell, das die relevanten Einflussfaktoren generell berücksichtigt, für den Ladungsübergang aufgestellt wurde. Eine ge-

wünschte Beeinflussung der Aufladungshöhe ist mit einem erheblichen versuchstechnischen Aufwand verbunden. Das Steuern der Trennprozesse setzt jedoch ein vertieftes Verständnis der Ladungsübergänge bei einer Kunststoffkontaktierung voraus, die letztlich zum Phänomen der triboelektrischen Aufladung führen.

Auf Grundlage der oben dargestellten Problematik formulierte man die **Zielstellung** dieser Arbeit. Die große Zahl der in früheren Arbeiten festgestellten Einflussfaktoren auf die triboelektrische Aufladung bei Zwei- und Mehrkomponenten-Gemischen und ihre Komplexität waren Anlass, das zu untersuchende System zu vereinfachen. Davon ausgehend legte man die Schwerpunkte für die Untersuchungen zunächst auf die Vorgänge bei der Aufladung nur eines Kunststoffes. Das Ziel besteht darin, ausgehend von der triboelektrischen Aufladung von Einkomponenten-Kunststoffproben, die Zusammenhänge zwischen dem Aufladungsverhalten der Kunststoffe und ihren Oberflächeneigenschaften aufzuzeigen und daraus auf das Aufladungsverhalten der Komponenten in einem Zwei- bzw. Mehrkomponenten-Gemisch zu schließen. Damit wäre es möglich, die Grundlagen für eine Formulierung von Ansätzen zu einer gezielten Beeinflussung des Ladungsvorgangs zu schaffen.

Die Kontaktierung der Kunststoffproben erfolgt über deren Oberfläche. Daher ist es erforderlich, die Kunststoffoberflächen zu charakterisieren. Mittels verschiedener Methoden wird der Einfluss von Wasser auf die Mobilität von Ladungsträgern geklärt. Weiterhin wird das Aufladungsverhalten durch die Lewis-Säure/Base-Eigenschaften der Kunststoffoberflächen charakterisiert.

Es ist bekannt, dass die Ladungshöhe von der Aufladungszeit und dem Wasser auf der Oberfläche abhängt und von Auf- und Entladungsvorgängen beeinflusst wird [10]. Ein wesentliches Arbeitsfeld stellen deshalb Untersuchungen zur Aufladungskinetik und zum Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf den Ladungsvorgang dar. Die maximal erreichbare Ladungshöhe und ggf. auftretende Umladungen sind für die Kunststofftrennung von besonderem Interesse.

Anhand der Erkenntnisse aus den Versuchen mit Kunststoffen einer Art erfolgt eine Auswertung von *Mientkewitz* [14] veröffentlichten Ergebnisse mit Zweikomponenten-Gemischen bzw. der eigenen Versuche mit Mehrkomponenten-Gemischen. Daraus soll auf das Aufladungsverhalten der Gemischkomponenten geschlossen werden.

## 2 Stand der Forschung zur triboelektrischen Aufladung von Festkörpern

Bringt man die Oberfläche zweier Körper in Kontakt, tritt aus thermodynamischen Gründen eine Umverteilung von Ladungsträgern auf. Durch Reibung der Kontaktpartner wird dabei lediglich die Anzahl der Kontaktstellen bzw. die Kontaktfläche vergrößert [16]. Wird der Kontakt der Körper gelöst, kann man in manchen Fällen eine Aufladung mit entgegengerichteter Polarität beobachten. Die Ladungshöhe hängt von einer Reihe von Einflussfaktoren ab (s. 2.5).

### 2.1 Energiebändermodell

Feste Stoffe weisen bezüglich ihrer elektrischen Leitfähigkeit ein unterschiedliches Verhalten auf. Darauf basierend unterteilt man sie in drei Stoffgruppen: Leiter, Halbleiter und Nichtleiter.

Nach dem Energiebändermodell der Festkörper können sich die Elektronen nur in bestimmten Bändern eines Atoms aufhalten. Die Valenzbänder sind voll mit Elektronen besetzt und tragen nicht zur Leitfähigkeit bei. Das energetisch oberste Band wird als Leitungsband bezeichnet. Es ist unvollständig mit Elektronen besetzt. Beim Anlegen eines elektrischen Feldes erfahren alle Elektronen des Leitungsbandes einen Impulszuwachs, es fließt ein elektrischer Strom. Zwischen dem Valenz- und Leitungsband kann eine Energielücke (verbotene Zone) existieren [17].

**Metalle** besitzen eine hohe elektrische Leitfähigkeit. Das resultiert entweder daraus, dass ihr oberstes Energieband nur teilweise besetzt ist (**Bild 1a**) oder dass das Valenzband voll besetzt ist, sich jedoch mit dem nächsten Energieband überschneidet (**Bild 1b**).

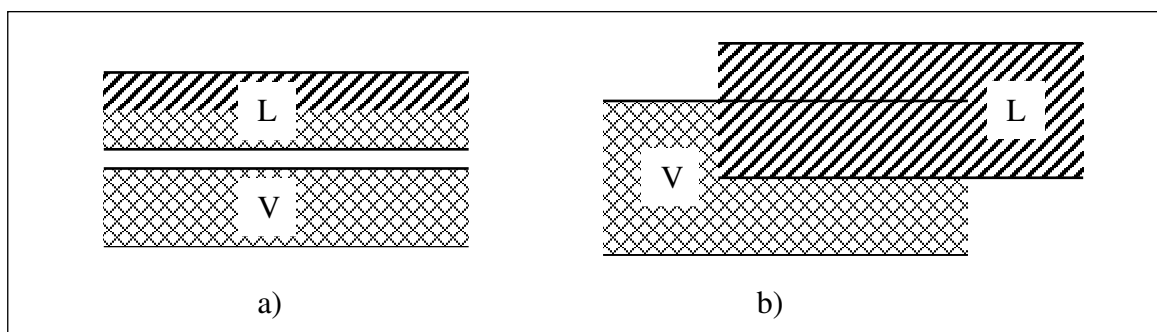


Bild 1: Energiebändermodell für Metalle

a) Leitungsband teilweise besetzt; b) Überlappung des Leitungsbandes mit dem Valenzband

L: Leitungsband; V: Valenzband

Mit steigender Temperatur nimmt der elektrische Widerstand eines metallischen Leiters zu. Eine höhere Temperatur führt in Metallen zu stärkeren Schwingungen der Gitteratome, was für die strömenden Elektronen ein größeres Hindernis darstellt.

Die Elektronen können aus der Metalloberfläche nicht ungehindert austreten. Die erforderliche Arbeit, um ein Elektron aus dem obersten Band zu entfernen, bezeichnet man als Elektronenaustrittsarbeit. Sie ist definiert als die Differenz der potentiellen Energie eines Elektrons zwischen Fermi- und Vakuum-Niveau. Das Fermi-Niveau ( $E_F$ ) stellt die Lage des Energie-Niveaus dar, dessen Besetzungswahrscheinlichkeit 0,5 beträgt.

**Halbleiter** zeichnen sich durch eine schmale Energielücke  $E_G < 1...2$  eV zwischen Valenzband und Leitungsband aus (**Bild 2**). Bei  $T = 0$  K ist die elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern gleich Null. Mit zunehmender Temperatur können immer mehr Elektronen in einem Eigenhalbleiter (**a**) durch thermische Anregung in das Leitungsband gelangen. Deshalb steigt mit zunehmender Temperatur die Leitfähigkeit. Bei einem Eigenhalbleiter liegt das Fermi-Niveau etwa in der Mitte zwischen Valenz- und Leitungsband.

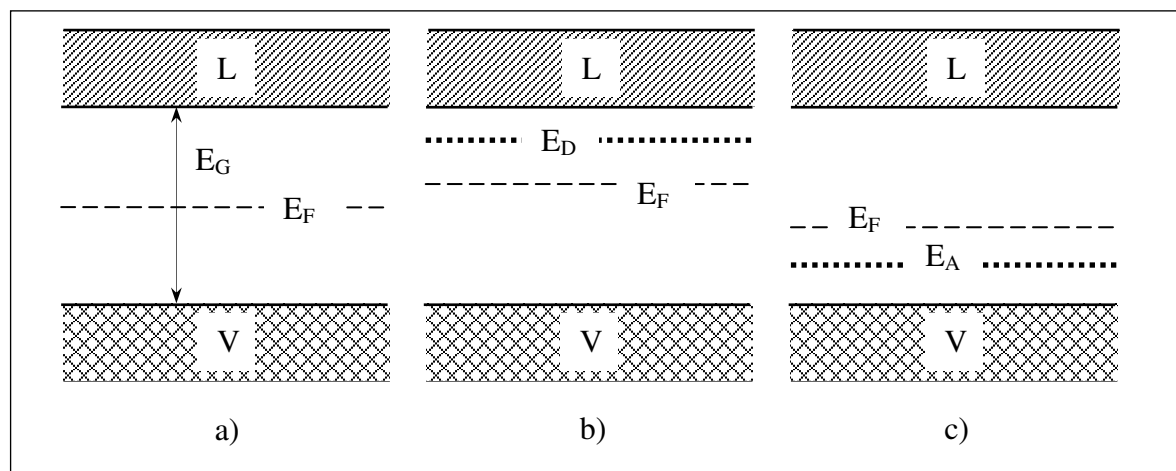


Bild 2: Energiebändermodell für Halbleiter

a) Eigenhalbleiter; b) n-Halbleiter; c) p-Halbleiter

L: Leitungsband; V: Valenzband;  $E_G$ : Breite der verbotenen Zone;  $E_F$ : Fermi-Niveau;

$E_D$ : Energieniveau der Donatorzustände;  $E_A$ : Energieniveau der Akzeptorzustände;

Neben dem Eigenhalbleiter existieren n- und p-Halbleiter. Bei n-Halbleitern sind Fremdatome mit überschüssigen locker gebundenen Bindungselektronen in den Halbleiter eingebaut (**b**). Diese fungieren als Elektronen-Donator-Zustände und führen zur Verschiebung des Fermi-Niveaus in Richtung Leitungsband. Bei p-Halbleitern (**c**) werden Fremdatome mit einem Mangel an Bindungselektronen in das Kristallgitter eingebaut. Es entstehen „Elektronenlöcher“, die als Elektronen-Akzeptor-Zustände wirken. Das Fermi-Niveau verschiebt sich in Richtung Valenzband.

Bei **Isolatoren** existiert eine breite Energielücke zwischen Valenzband und Leitungsband. So können nur Elektronen mit sehr hoher Energie vom Valenzband zum Leitungsband gelangen. Ein äußeres elektrisches Feld verursacht nur eine Polarisierung [18, 19]. Diese Modellvorstellung ist stark vereinfacht und gilt nur für hochreine Isolatoren. Technische Polymere enthalten Fremdstoffe, wie z. B. oberflächlich adsorbierte Atome und Moleküle sowie Additive. Diese können Elektronen-Donator- bzw. Elektronen-Akzeptor-Zustände hervorrufen. **Bild 3** stellt ein Energiebändermodell von Kunststoffen mit Oberflächen- und Volumenzuständen nach [20] dar. Die Struktur des Modells ist durch lokalisierte Energiezustände charakterisiert, die durch eine Potentialbarriere voneinander getrennt sind. Der

Transport der Elektronen zwischen benachbarten Zuständen erfolgt durch einen sogenannten Hopping-Prozess („Hüpfen“) [21, 22]. Man unterscheidet Oberflächen- und Volumenzustände. Eine exakte Abgrenzung wegen der undefinierten Dicke der gegenüber dem idealen Zustand veränderten Kunststoffoberfläche ist jedoch kaum möglich.

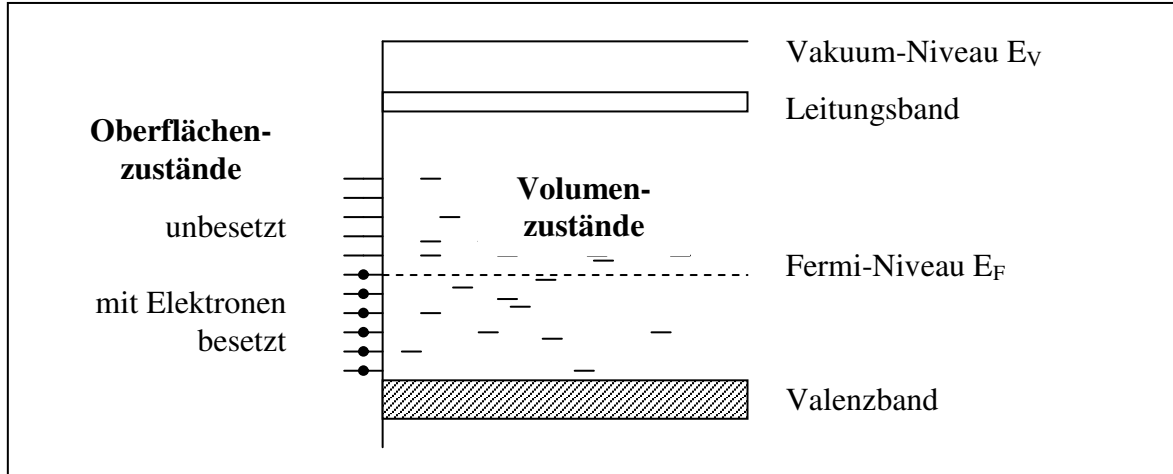


Bild 3: Energiebändermodell für Kunststoffe [20]

Bei einem **Metall-Metall-Kontakt** stellt sich zwischen den Kontaktpartnern ein thermodynamisches Gleichgewicht ein. Das heißt, ihre Fermi-Niveaus gleichen sich aus (**Bild 4**).

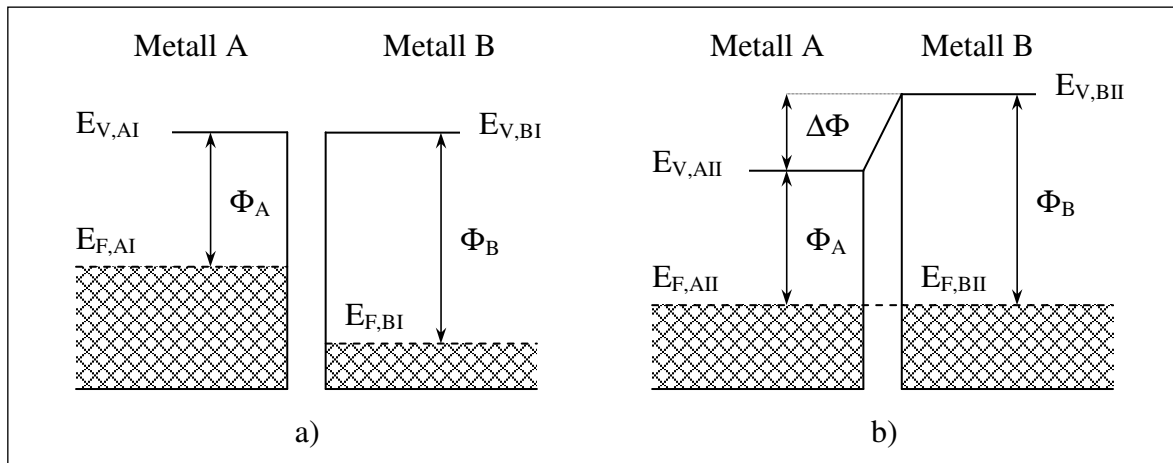


Bild 4: Ausgleich der Fermi-Niveaus beim Kontakt zweier Metalle  
a) vor dem Kontakt; b) nach dem Kontakt

Die Vakuum-Niveaus der zwei Metalle ergeben sich nach dem Kontakt aus

$$E_{V,AII} = E_{F,AII} + \Phi_A \quad (1)$$

$$E_{V,BII} = E_{F,BII} + \Phi_B \quad (2)$$

Aus der Differenz der Vakuum-Niveaus ist das Kontaktpotential (Kontaktspannung) zu berechnen [24, 25]:

$$U_K = \frac{E_{V,BII} - E_{V,AII}}{e} = \frac{\Phi_B - \Phi_A}{e} \quad (3)$$

Die übergeladene Ladung hängt vom Kontaktpotential, von der Leitfähigkeit und der geometrischen Anordnung der Kontaktflächen ab [26]:

$$Q = U_K \cdot C \quad (4)$$

mit  $C$  als Kapazität, die aus der Anordnung der Kontaktfläche zu berechnen ist:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{s} \quad (5)$$

mit  $A$  als effektive Kontaktfläche und  $s$  als Abstand zwischen den Flächen.

Werden die Metalloberflächen voneinander getrennt, fließen die Elektronen während des Trennvorgangs fast vollständig zurück. In [66] ist dokumentiert, dass der Rückfluss der Ladungen auch durch Tunneln oder durch Gasentladungen ablaufen kann.

Auch bei einem **Metall-Eigenhalbleiter-Kontakt** kommt es zu einem Ausgleich der Fermi-Niveaus, der so abläuft, dass aus dem Kontaktpartner mit der kleineren Elektronenaustrittsarbeit Elektronen zum Kontaktpartner mit größerer Elektronenaustrittsarbeit übertreten.

Etwas komplizierter ist der Fall bei einem **Metall-n- bzw. p-Halbleiter-Kontakt**.

Kontaktiert ein Metall einen **n-Halbleiter**, wobei  $\Phi_M > \Phi_{HL}$ , so entsteht das in **Bild 5** dargestellte Bänderschemata. Die Grenzschicht des n-Halbleiters verarmt an Elektronen und folglich erhöht sich ihr elektrischer Widerstand im Vergleich zum Inneren des Halbleiters. Dadurch kommt es im Bereich der Kontaktfläche zu einer Bandverbiegung im Halbleiter.

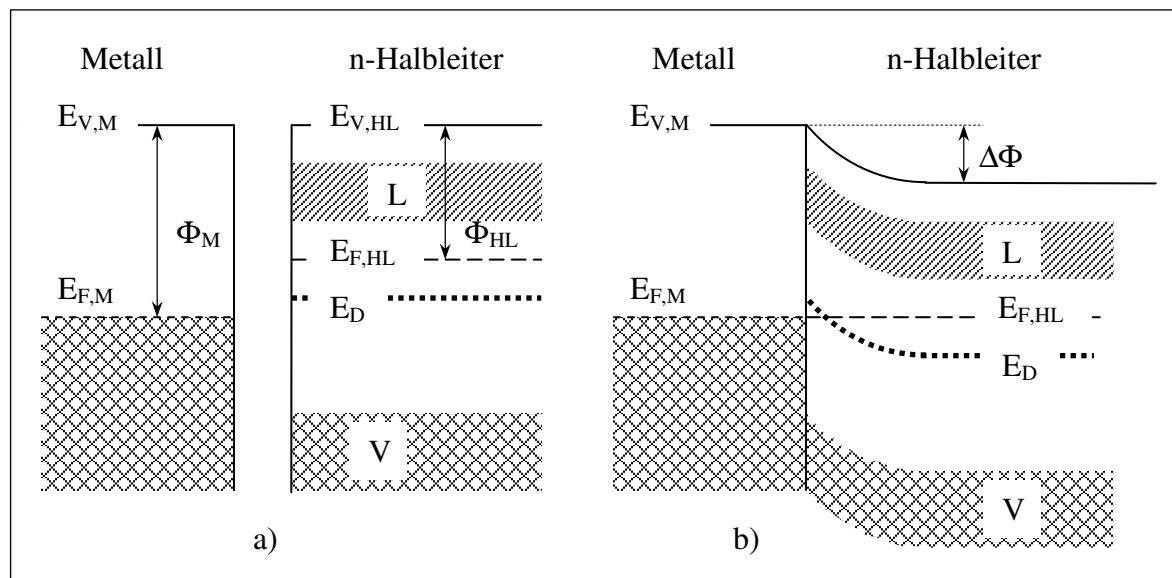


Bild 5: Ausgleich der Fermi-Niveaus beim Metall-n-Halbleiter-Kontakt;  $\Phi_M > \Phi_{HL}$   
a) vor dem Kontakt; b) nach dem Kontakt

Die Bandverbiegung führt zur Ausbildung einer Sperrschicht, die das freie Fließen der Elektronen in Richtung Metalloberfläche durch eine Potenzialbarriere (Schottky-Barriere)

verhindert [28]. Im Fall  $\Phi_M < \Phi_{HL}$  entsteht eine Flieschicht. Die Grenzfläche des Halbleiters wird an Elektronen angereichert, folglich verringert sich ihr elektrischer Widerstand im Vergleich zum Inneren des Halbleiters.

Ähnliche Verhältnisse herrschen, wenn ein Metall einen **p-Halbleiter** kontaktiert. Im Fall  $\Phi_M < \Phi_{HL}$  kommt eine Potenzialbarriere zustande (**Bild 6**), bei  $\Phi_M > \Phi_{HL}$  entsteht dagegen eine Flieschicht.

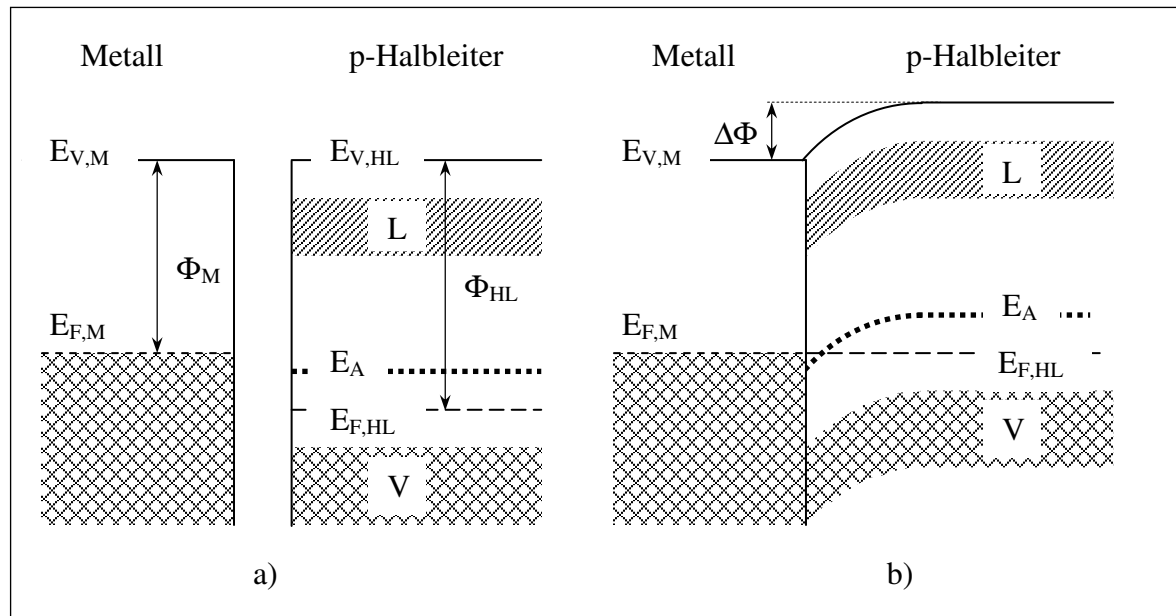


Bild 6: Ausgleich der Fermi-Niveaus beim Kontakt von Metall und p-Halbleiter  
a) vor dem Kontakt; b) nach dem Kontakt

Bei **Halbleiter-Halbleiter-Kontakt** mit unterschiedlichem Fermi-Niveau kommt es in beiden Kontaktpartnern zu Bandverbiegungen. Der Halbleiter mit der kleineren Elektronenaustrittsarbeit lädt sich positiv, der andere negativ auf.

In idealen Isolatoren ist die Besetzungswahrscheinlichkeit des Leitungsbandes mit Elektronen gleich Null. Beim **Kontakt eines idealen Isolators mit einem Metall** oder mit einem anderen Isolator kann dieser demzufolge weder Elektronen aufnehmen noch abgeben. Eine Kontaktaufladung findet folglich nicht statt.

In realen Isolatoren können jedoch Energiezustände (Oberflächen- und Volumenzustände) vorhanden sein (s. **Bild 3**), die bei einem Kontakt als Elektronen-Akzeptor bzw. -Donator fungieren und damit eine Aufladung ermöglichen (s. **2.1.2**).

## 2.2 Modellvorstellungen zur Kunststoffaufladung

In der Literatur werden zwei grundsätzliche Mechanismen der triboelektrischen Aufladung diskutiert. Dies sind die Aufladung durch Elektronentransport und die Aufladung durch Ionentransport zwischen den kontaktierenden Oberflächen. Neben ihnen existieren noch einige weitere Modellvorstellungen, wie die Aufladung durch Materialübergang [35] oder

die Aufladung durch intrinsische Ladungen [26]. Diese werden im Vergleich zu den zwei Hauptmechanismen in der Literatur aber wenig diskutiert.

### 2.2.1 Elektronentransport-Theorie

Nach der Elektronentransport-Theorie sind Elektronen für die triboelektrische Aufladung verantwortlich.

*Davis* [27] ermittelte die Elektronenaustrittsarbeit ausgewählter Kunststoffe (**Tabelle 1**). Dabei wurden die **Kunststoffe mit Metallen** bekannter Elektronenaustrittsarbeit kontaktiert.

Tabelle 1: Elektronenaustrittsarbeit von Kunststoffen nach *Davis* [27]

Material	Elektronenaustrittsarbeit in eV
PVC	$4,85 \pm 0,20$
PI	$4,36 \pm 0,06$
PTFE	$4,26 \pm 0,05$
PC	$4,26 \pm 0,13$
PET	$4,25 \pm 0,10$
PS	$4,22 \pm 0,07$
PA 66	$4,08 \pm 0,06$

Zwischen der gemessenen Ladungshöhe bzw. der Polarität der Aufladung von Kunststoffen und der Elektronenaustrittsarbeit der Metalle wurde ein linearer Zusammenhang gefunden. *Davis* stellte die folgende Gleichung für die Höhe der Aufladung auf:

$$Q = -\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r}{\lambda} \left( \frac{\Phi_{KS} - \Phi_M}{e} \right) \quad (6)$$

mit  $\lambda$  als Penetrationstiefe der Elektronen in der Bulkphase der Kunststoffe.

Eine Erweiterung der Experimente durch **Kunststoff-Kunststoff-Kontaktierung** erbrachte den Nachweis einer Korrelation zwischen der Differenz der Elektronenaustrittsarbeit und der Ladungshöhe. *Davis* schlussfolgerte, dass der Ladungstransfer auf dem Austausch von Elektronen basiert. Weiterhin wurde die Metall-Kunststoff-Aufladung dahingehend interpretiert, dass sich die Kunststoffe wie p-Halbleiter mit einer breiten verbotenen Zone verhalten.

Kunststoffe mit geringer Leitfähigkeit können eine hohe Aufladung aufweisen. Die hohe Aufladungsgeschwindigkeit konnte man allerdings nicht erklären (Relaxationszeit-Problem). Die Ausbildung eines thermodynamischen Gleichgewichtszustandes sollte erwartungsgemäß im Bereich der Relaxationszeit liegen. Diese müsste bei Kunststoffen ggf. mehrere Stunden betragen [28]. Das Problem wurde mit der Annahme gelöst, dass während der Kontaktierung überwiegend die Oberflächenzustände für den Aufladungsvorgang



bestimmend sind. Eine Beteiligung von Volumenzuständen ist nicht signifikant. Dieser Mechanismus des Elektronentransfers ist in der Literatur als **Oberflächenzustands-Theorie** (surface state theory) bekannt [29 bis 34].

Die Oberflächenzustände, die als Elektronen-Akzeptor/Donator fungieren können, sind nur bis zum Fermi-Niveau mit Elektronen besetzt. Bei **Metall-Kunststoff-Kontaktierung** fließen die Elektronen je nach energetischer Lage der Fermi-Niveaus von der Kunststoffoberfläche ab oder zu ihr hin. Dabei werden die Kontaktflächen positiv bzw. negativ aufgeladen (**Bild 7**) [35, 36].

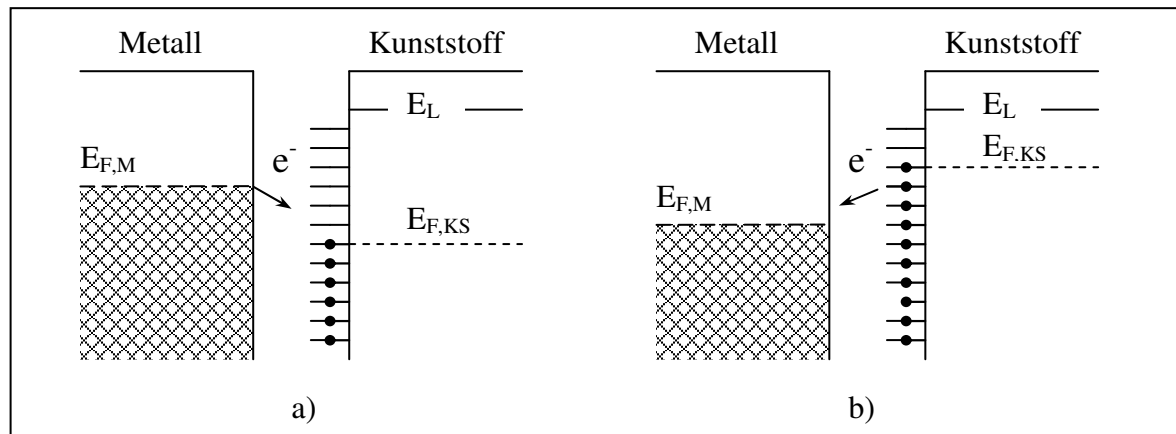


Bild 7: Elektronenübergang bei Metall-Kunststoff-Kontaktierung

a)  $E_{F,M} > E_{F,KS}$ ; b)  $E_{F,M} < E_{F,KS}$

In der Oberflächenzustands-Theorie unterscheidet man je nach Dichte der Oberflächenzustände zwischen hoher und niedriger Dichte. Die Grenze zwischen ihnen liegt bei einer Zustandsdichte von etwa  $10^{13} \text{ (eV}\cdot\text{cm)}^{-1}$  [29, 33]. Im Bereich niedriger Oberflächenzustandsdichte hängt die Aufladung der Oberfläche linear von der Dichte der Oberflächenzustände der Kunststoffe ab. Die Elektronen fließen bei einem Kontakt ungehindert durch die Kontaktfläche, bis die Oberflächenzustände im Gleichgewichtszustand besetzt sind. Das sich aufbauende elektrische Feld ist zu schwach, um die Energiebänder zu verschieben (**Bild 8**).

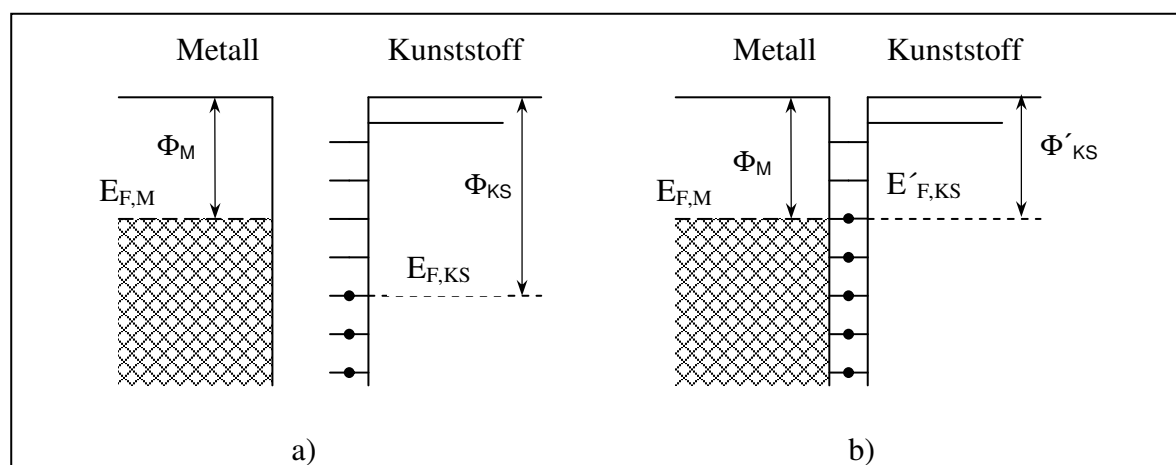


Bild 8: Elektronenübergang zwischen Metall und Kunststoff mit niedriger Oberflächenzustandsdichte

a) vor dem Kontakt; b) nach dem Kontakt

Im Bereich hoher Oberflächenzustandsdichte beeinflusst diese die Aufladung nicht. In diesem Fall fließen größere Mengen Elektronen durch die Kontaktfläche. Sie bauen ein starkes elektrisches Feld zwischen den Kontaktflächen auf, sodass sich die Energiebänder verschieben (**Bild 9**). Dies bildet eine Barriere für die Elektronen, wodurch ein weiterer Elektronenübergang verhindert und die Aufladung begrenzt wird [32, 36, 37, 38]. Das entstehende Kontaktpotential ist annähernd gleich der Differenz der Elektronenaustrittsarbeit der Kontaktpartner.

Eine Berechnung der transferierten Ladungen für Metall-Kunststoff-Kontaktierung wurde von *Krupp* [31] und *Bässler* [33] veröffentlicht.

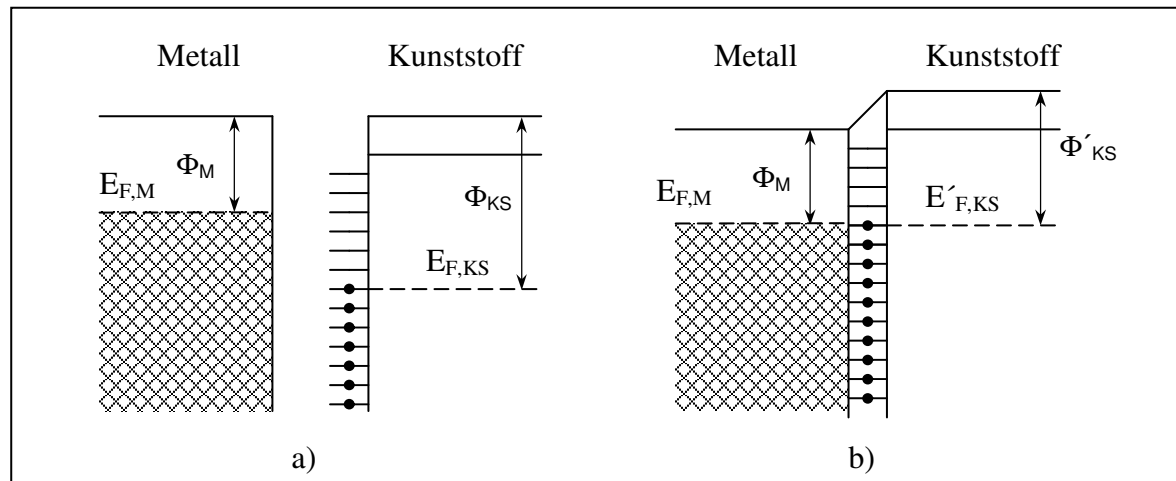


Bild 9: Elektronenübergang zwischen Metall und Kunststoff mit hoher Oberflächenzustandsdichte  
a) vor dem Kontakt; b) nach dem Kontakt

Zahlreiche Autoren haben den Einfluss der Elektronenaustrittsarbeit auf die Aufladung bei einer Metall-Isolator-Kontaktierung untersucht, wobei eine Reihe von unterschiedlichen Isolatoren und Metallen Verwendung fanden. Einen Überblick der untersuchten Materialien zeigt **Tabelle 2**.

*Cunningham* [40], *Wåhlin* und *Bäckström* [42], *Greason* und *Inculet* [44], *Lowell* [45], *Dervos* und *Truscott* [49] und *Follows et al.* [54] fanden einen Zusammenhang zwischen der Elektronenaustrittsarbeit der Metalle und der triboelektrischen Aufladung. Damit konnten die Ergebnisse von *Davis* [27, 41] bestätigt werden. So wurde der Ladungstransfer als Elektronenübergang postuliert. Kritisch ist anzumerken, dass die gefundenen Zusammenhänge nicht in jeder Veröffentlichung einen eindeutig linearen Zusammenhang darstellen. Dagegen konnten *Elsdon* und *Mitchell* [46] beim PP-Metall-Kontakt keinen Einfluss der Elektronenaustrittsarbeit auf die Aufladung nachweisen.

*Akande* und *Lowell* [50, 52] führten umfangreiche Untersuchungen durch, die widersprüchliche Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses der Elektronenaustrittsarbeit auf die Aufladung lieferten. In [50] wurden PA und PTFE mit verschiedenen Metallen kontaktiert. PTFE lud sich immer negativ auf und die Ladungshöhe zeigte keine Abhängigkeit von der Elektronenaustrittsarbeit der Metalle. PA lud sich dagegen vorwiegend positiv auf und die Ladungshöhe korrelierte mit der Elektronenaustrittsarbeit der Metalle. Dabei waren die

Messwerte mit einer erheblichen Streuung verbunden. In [52] wurde die Anzahl der untersuchten Kunststoffe und Metalle wesentlich erweitert. Es wurde festgestellt, dass die Aufladung einiger Kunststoffe mit der Elektronenaustrittsarbeit der Metalle korreliert. Mit steigender Elektronenaustrittsarbeit nahm die Aufladung zu. Diesen Zusammenhang kann man allerdings nicht als linear bezeichnen. Dagegen zeigten andere Kunststoffe gar keine Korrelation. Das führte zur Aussage, dass der lineare Zusammenhang zwischen Elektronenaustrittsarbeit und der triboelektrischen Aufladung nicht universal gültig ist.

Weitere Ergebnisse in [56 bis 60] haben gezeigt, dass die Aufladung der Kunststoffe als ein Resultat von Auf- und Endladungsvorgängen zu betrachten ist.

Tabelle 2: Verwendete Materialien für Untersuchungen zum Einfluss der Metallart bei Metall/Kunststoff-Kontaktierung

Literatur	Metall	Isolator
Davis [39]	Pt, Ag, Pd, Cd, Al	Glas, PE
Cunningham und Hood [40]	Stahl, Ni, Cr	Röntgen-Film
Davis [27, 41]	Cd, Au, Zr, Pt, Al	PVC, PI, PTFE, PC, PET, PS, PA 66
Wählin und Bäckström [42]	Al, Au, Cu, Mg, Ni, Pt, Dural	PTFE
Neill und Foord [43]	Al, Cu	PP
Greason und Inculet [44]	Al, Ni, Au, Pt	PS, PA, HDPE, LDPE, PP, PTFE, PVC, Glas, Quarz
Lowell [45]	Pt, Au, Ni, Rh, Al	PE, PTFE, PET
Elsdon und Mitchell [46]	Au, Ag, Ni, Sn, Al	PP
Lowell [47]	Ni, Mg	PE
Murata et al. [48]	Al, Cr	PE
Dervos und Truscott [49]	Ag, Cu, In, Al	Silikon
Akande und Lowell [50]	Mg, Al, Pb, Nb, Au, Rh, Ag, Ni, Zn, Stahl, Pt, Cu, Sn, In, Bi	PA 66, PTFE
El-Kazzaz und Rose-Innes [51]	In, Ga, Hg	PTFE, PE, PA, PS, PV-Alc., Corundum
Akande und Lowell [52]	Mg, Al, Zn, Sn, Pb, Ni, Cu, Au, Pt	PVA, PC, CA, PMMA, PA
Cunningham [53]	Au, Cu, Sn	HDPE, LDPE, PTFE, PEEK
Follows et al. [54]	Al, Mg, Au, Pt	PA 66
Akande und Adedoyin [55]	Mg, Al, Nb, Zn, Pb, Stahl, Rh, Pt, Ag, Cu, Au, Ni	PMMA, P2VP, PS, PTFE, PVC

Im Vergleich zur Metall-Kunststoff-Kontaktierung wurde die **Kunststoff-Kunststoff-Kontaktierung** nicht so intensiv erforscht und der Aufladungsvorgang ist weniger bekannt. Die beim Kontakt zweier Kunststoffe entstehende Ladungspolarität und die daraus aufgestellten triboelektrischen Reihen werden in Kapitel 2.3 vorgestellt. Es ist allgemein verbreitet, die aufgestellten Modelle für die Metall-Kunststoff-Kontaktierung auch für die Kunststoff-Kunststoff-Kontaktierung zu verwenden und den Ladungsübergang mit dem selben Mechanismus zu erklären [18].

Nach der Oberflächenzustands-Theorie treten die Elektronen bei einer Kunststoff-Kunststoff-Kontaktierung aus den Oberflächenzuständen geringerer Elektronenaustrittsarbeit in die mit höherer Elektronenaustrittsarbeit über. **Bild 10** zeigt Energiebänder-Schemata für Kunststoffe niedriger Oberflächenzustandsdichte und **Bild 11** für Kunststoffe hoher Oberflächenzustandsdichte.

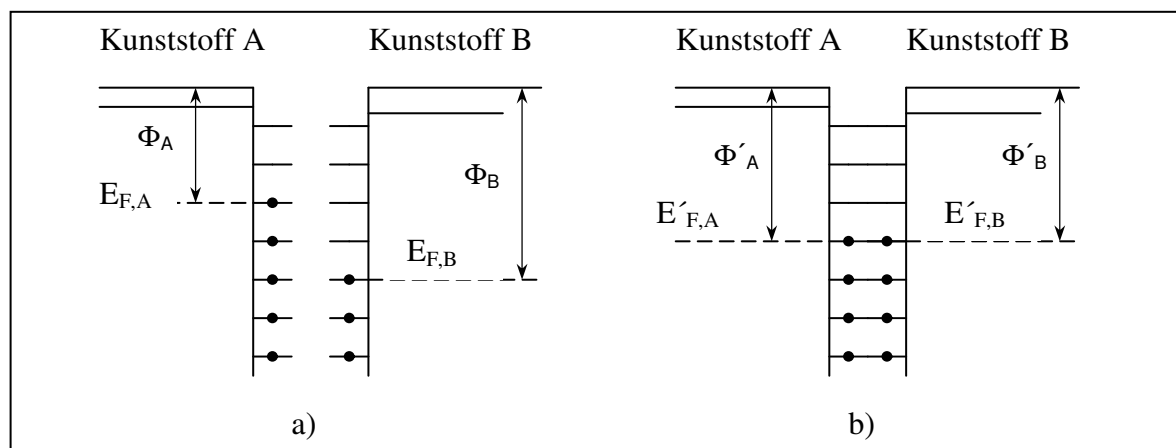


Bild 10: Elektronenübergang zwischen Kunststoffen mit niedriger Oberflächenzustandsdichte  
a) vor dem Kontakt; b) nach dem Kontakt

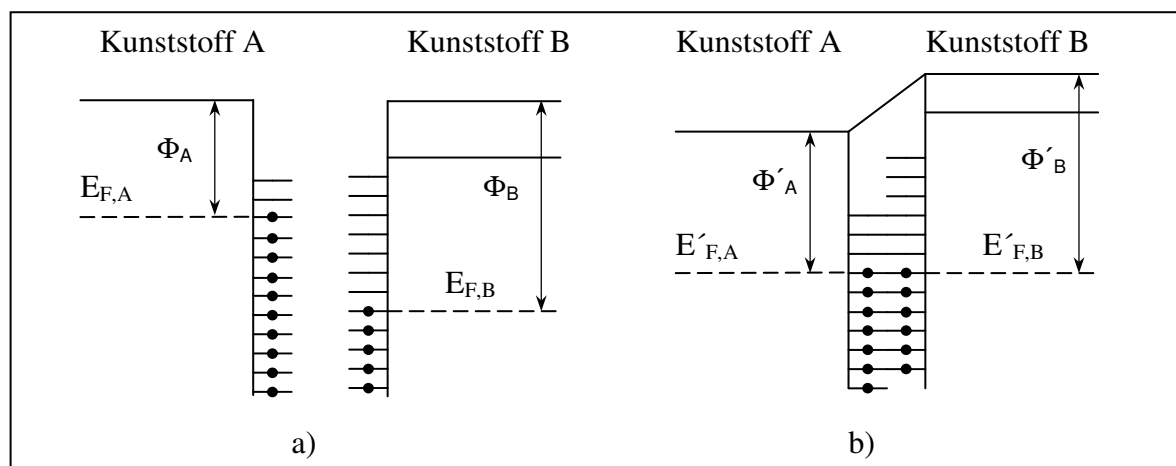


Bild 11: Elektronenübergang zwischen Kunststoffen mit hoher Oberflächenzustandsdichte  
a) vor dem Kontakt; b) nach dem Kontakt

Über die **Kontaktierung artgleicher Kunststoffe** miteinander ist bislang noch weniger bekannt. Aus Symmetriegründen ist nicht zu erwarten, dass bei einem Kontakt artgleicher

Kunststoffe ein Ladungstransfer zwischen den Kontaktflächen zustande kommt. Trotzdem wurde dieses Phänomen beobachtet [61 bis 65].

*Henry* [61] hat betont, dass die Kontaktpartner bei einer Kontaktierung asymmetrisch beansprucht werden können. Als Beispiel wurde der Kontakt zwischen der Saite und dem Bogen einer Violine erwähnt. Er vermutete, dass die asymmetrische Kontaktierung zur Temperaturdifferenz der Kontaktflächen führt, was letztlich einen Ladungsübergang zwischen identischen Stoffen hervorruft. Diese Erklärung würde aber nach *Lowell* und *Truscott* [63] bedeuten, dass eine Erhöhung der Kontaktgeschwindigkeit zu einer stärkeren Aufladung führt, was jedoch nicht nachgewiesen werden konnte.

Das Modell von *Lowell* und *Truscott* [64] erklärt die Aufladung bei einem asymmetrischen Kontakt identischer Kunststoffe damit, dass sich die Oberflächenzustände an den Kunststoffen nicht in einem thermodynamischen Gleichgewichtszustand befinden. Das heißt, dass bei einem Kontakt zweier Kunststoffteilchen keine Differenz in einer physikalischen Größe (z. B. Temperaturdifferenz der Kontaktflächen) bestehen muss, damit sich Ladungsübergänge abspielen können. Ein Ladungsträger kann während der Kontaktierung von einem höheren energetischen Niveau der Kontaktfläche A zu einem niedrigeren Energieniveau der Kontaktfläche B transferiert werden (**Bild 12**).

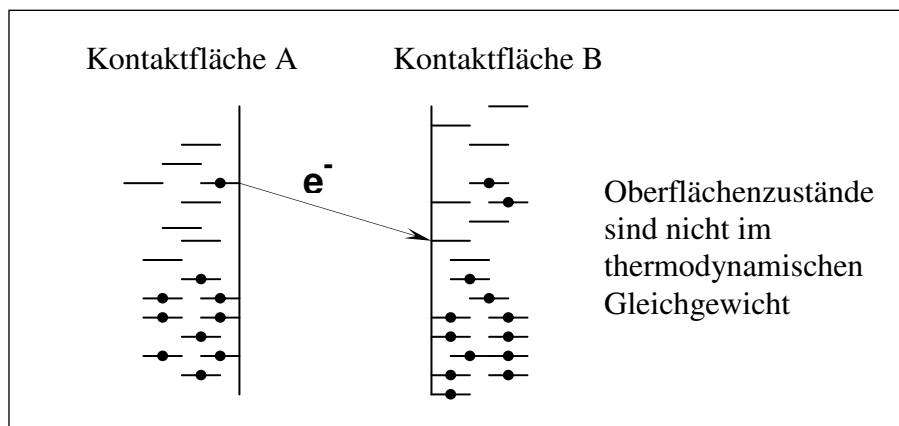
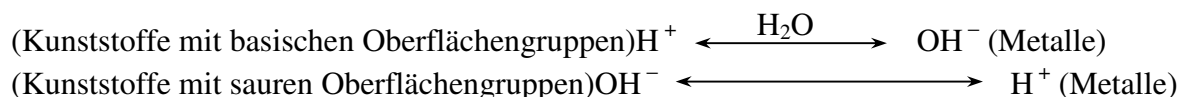


Bild 12: Elektronenübergang zwischen Kunststoffen gleicher Art [64]

## 2.2.2 Ionentransport-Theorie

*Brück* [67] untersuchte unter atmosphärischen Bedingungen die Kontaktaufladung von 18 Kunststoffen miteinander und mit 17 unterschiedlichen Metallen. Er stellte fest, dass die Aufladung der Kunststoffe von ihren polaren Gruppen bestimmt wird. Der Ladungsvorgang wurde mit den Donator-Akzeptor-Wechselwirkungen dieser polaren Gruppen sowie mit einem Protonenübergang erklärt. Die Protonen stammten entweder aus der Dissoziation von adsorbiertem Wasser oder aus den Säuregruppen der Kunststoffoberfläche. Der Aufladungsmechanismus bei Metall-Kunststoff-Kontaktierung wurde wie folgt formuliert:



Dementsprechend laden sich Kunststoffe mit überwiegend basischem Charakter der Oberflächengruppen (wie z. B.  $-\text{OH}$ ,  $-\text{CH}$ ,  $-\text{O}-$ ,  $-\text{NH}-$ ) gegen Metall bevorzugt positiv, mit saurem Charakter (wie z. B.  $-\text{Cl}$ ,  $-\text{F}$ ) bevorzugt negativ auf.

In der von *Brück* aufgestellten triboelektrischen Reihe haben alle Metalle die gleiche Position (s. **2.3**). Dies bekräftigt die Annahme, dass Ionen und nicht Elektronen als Ladungsträger fungieren. Bei einem Elektronentransfer zwischen den Kontaktflächen wäre wegen ihrer unterschiedlichen Elektronenaustrittsarbeit ein abweichendes Aufladungsverhalten der Metalle zu erwarten. Auch die Aufladung zweier Kunststoffe kann man mit den Säure/Base-Eigenschaften der Oberflächengruppen erklären. Oberflächen mit saurem Charakter laden sich durch Abspalten von  $\text{H}^+$  bzw. durch Bindung von  $\text{OH}^-$  negativ auf. Kunststoffe mit basischen Oberflächengruppen können  $\text{H}^+$  adsorbieren oder  $\text{OH}^-$  abgeben und sich dabei positiv aufladen.

*Mizes et al.* [70] konnten einen Ionentransport bei der Kontaktaufladung von Polystyrol gegen Metall direkt nachweisen. Bei ihren Untersuchungen wurde Polystyrol mit Cetylpyridiniumbromid versetzt und die Aufladung gegen Indium gemessen. Durch den Kontakt mit der Iridiumoberfläche erhielt das behandelte Polystyrol eine starke positive Aufladung, während sich die unbehandelte Probe schwach negativ auflud. Mittels Sekundärionen-Massenspektrometrie wurden auf den Kontaktflächen des Indiums Bromid-Ionen gefunden, die bei der Kontaktierung von der Polystyroloberfläche übertraten und dadurch die positive Aufladung des Kunststoffes verursachten.

Auch Untersuchungen anderer Autoren weisen darauf hin, dass adsorbierte Wassermoleküle und Ionen für die Aufladung von Kunststoffen verantwortlich sind bzw. die wesentlich beeinflussen können [69, 71, 72]. Die maximale Ladungsdichte wird nicht bei jedem Kunststoffgemisch in trockener Atmosphäre erreicht. In einigen Fällen begünstigt eine höhere relative Luftfeuchtigkeit eine deutlich höhere Aufladung [14, 104, 105].

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die triboelektrische Aufladung der Kunststoffe hinsichtlich der Ladungsträger und des Ladungsübergangs noch einige offene Fragen lässt. Wie von *Lee* [59] beschrieben wurde, nehmen an einer Kontaktaufladung wahrscheinlich sowohl Elektronen als auch Ionen am Ladungstransport teil. Welcher der beiden Mechanismen dabei überwiegt, ist von den Oberflächeneigenschaften der Kontaktpartner (wie z. B. an der Oberfläche vorhandene Ionen, Ausbildung lokaler Oberflächenzustände) und von den Versuchsbedingungen (wie z. B. Luftfeuchtigkeit, Temperatur) abhängig.

## 2.3 Triboelektrische Reihe und chemische Struktur

Kontaktiert man zwei unterschiedliche Kunststoffe miteinander, erfolgt eine stoffspezifische Aufladung. Durch Messen der Polarität der Aufladung der Kontaktpartner lässt sich eine triboelektrische Reihe (TER) aufstellen (**Tabelle 3**). Ein beliebiges Material in der TER erfährt beim Kontakt mit einem darüber stehenden Stoff eine negative, mit einem darunter stehenden eine positive Aufladung. Aus der Position eines Materials in der TER

kann man allerdings nicht auf die Höhe der Aufladung schließen. Es wurde jedoch beobachtet, dass sich weit voneinander entfernt eingeordnete Materialien gegeneinander stark aufladen.

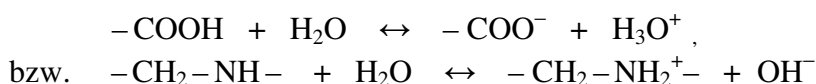
Tabelle 3: Beispiele für Triboelektrische Reihen

Henniker [73]		Brück [67]	
+		+	
Glas		PEI	Polyethylenimin
PMMA	Polymethylmetacrylat	PEO	Polyethylenoxid
PA 11	Polyamid 11	PUR	Polyurethan
PA 66	Polyamid 66	PMMA	Polymethylmetacrylat
CA	Celluloseacetat	PC	Polycarbonat
PDP	Polydiallylphthalat	CA	Celluloseacetat
PUR	Polyurethane	PVAL	Polyvinylalkohol
SAN	Styren-Acrylnitril-Copolymer	PA	Polyamid
SB	Styren-Butadien-Copolymer	ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
PS	Polystyrol	Metalle	
PB	Polyisobutylene	PS	Polystyrol
PVB	Polyvinylbutyral	PE	Polyethylen
Gummi		PP	Polypropylen
PAN	Polyacrylnitril	PET	Polyethylenterephthalat
PE	Polyethylen	RUC	Chlorkautschuk
PVC	Polyvinylchlorid	PVDC	Polyvinylidenchlorid
PTFE	Polytetrafluorethylen	CN	Cellulosenitrat
–		PVC	Polyvinylchlorid
(Auszug)		PFFE	Polytetrafluorethylen
		–	

Die in der Literatur angegebenen Triboelektrischen Reihen weichen z. T. deutlich voneinander ab [27, 67, 69, 73, 75]. Der Grund dafür ist in den unterschiedlichen Kontaktierungsbedingungen und in den verschiedenen Additiven im Kunststoff zu sehen.

## 2.4 Aufladungsverhalten und Säure-Base-Eigenschaften

Nach dem Brönsted-Säure-Base-Konzept [88] ist eine Säure als Protonen-Donator und eine Base als Protonen-Akzeptor definiert. Mit dieser Definition lässt sich jedes Lösungsmittelsystem, das Protonen enthält, behandeln. Oberflächengruppen können gegenüber wässrigen Elektrolytlösungen als Brönsted-Säure bzw. Brönsted-Base wirken, wie das folgende Beispiel zeigt:



Nach der Definition von *Lewis* [89] wird eine Base als Elektronenpaar-Donator, die Säure als Elektronenpaar-Akzeptor bezeichnet. Das Proton ist im Lewis'schen Sinn eine Säure. Eine Base im Lewis'schen Sinn ist auch eine Brönsted-Base.

*Augsburg* [90] hat den Zusammenhang zwischen den Oberflächenpolaritätseigenschaften und dem elektrostatischen Aufladungsverhalten verschiedener Kunststoffe untersucht. Dabei erwiesen sich die mittels Adsorption solvatochromer Farbstoffe ermittelten Elektronenpaar-Akzeptor/Donator-Eigenschaften für die Charakterisierung der Kunststoffoberflächen als geeignet. Die gefundenen Lewis-Säure/Base-Eigenschaften korrelierten mit der aufgestellten TER (**Bild 13**).

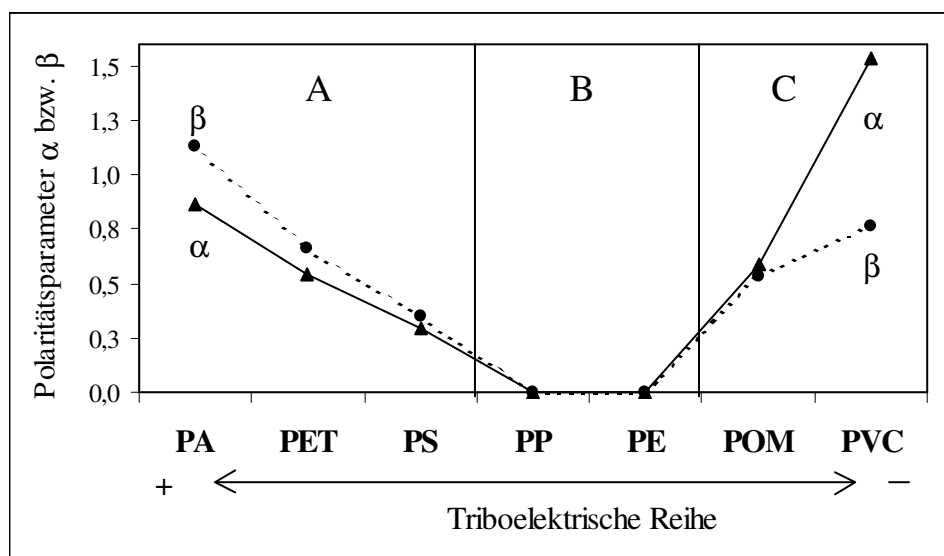


Bild 13: Zusammenhang zwischen den Lewis-Säure-Base-Eigenschaften und dem Aufladungsverhalten der Kunststoffe [90]

Die Oberfläche von Kunststoffen am positiven Ende der TER (wie z. B. PA) weisen überwiegend Lewis-basische Eigenschaften (Elektronenpaar-Donator), am negativen Ende der TER (wie z. B. PVC) Lewis-saure Eigenschaften (Elektronenpaar-Akzeptor) auf. Die Lewis-Säure/Base-Eigenschaften können den funktionellen Gruppen der Kunststoffe zugeordnet werden. Die unpolaren Kunststoffe, wie z. B. PE und PP, die in der Mitte der TER eingeordnet sind, besitzen nur sehr schwache Lewis-Säure/Base-Eigenschaften. Dass sich diese Kunststoffe in einem Gemisch trotzdem stark aufladen können, wurde in der Existenz adsorbierter Wassermoleküle, die als Brönsted-Säure bzw. -Base ( $H^+$ -Akzeptor/Donator-Eigenschaften) fungieren können, vermutet. Es wurde weiterhin geschlossen, dass die triboelektrische Aufladung das Ergebnis einer Überlagerung von Elektronen- und Ionentransfer ist. Das setzt ein Vorhandensein von Elektronen-Akzeptor/Donator-Zuständen sowie mobile Ionen an der Oberfläche voraus.



## 2.5 Einflussfaktoren auf die triboelektrische Aufladung

Höhe und Polarität der triboelektrischen Aufladung hängen von den stoffspezifischen Eigenschaften der am Ladungsvorgang beteiligten Komponenten und den äußeren Einflussfaktoren ab. Obwohl zahlreiche Untersuchungsergebnisse veröffentlicht wurden, gibt es noch kein Modell, das diese Parameter generell berücksichtigt.

Oft diskutierte Parameter sind:

- elektrische Eigenschaften (elektrischer Widerstand, Dielektrizitätszahl)
- atmosphärische Bedingungen (relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Druck, Ionen in der Luft)
- Gasentladungserscheinungen
- Kontaktierungsbedingungen (Aufladungsart und -intensität, Kontaktanzahl, Aufladungsdauer)
- Modifikation der Oberfläche.

### 2.5.1 Elektrische Eigenschaften

Prinzipiell können bei jedem Vorgang, wo Körper miteinander in Kontakt kommen, triboelektrische Aufladungen entstehen. Im Wesentlichen bestimmt der **Oberflächenwiderstand** die Aufladbarkeit eines Stoffes [91]. Sind die beteiligten Kontaktpartner gut leitfähig, können die Ladungen nach einem Kontakt während des Trennvorganges sofort zurückfließen. Nach [92] ist bei einem Volumenwiderstand von  $<10^{10} \Omega\text{m}$  nicht mit elektrostatischen Aufladungen zu rechnen. Isolatoren können dagegen die beim Kontakt aufgenommenen Ladungen auch nach der Trennung der Kontaktpartner behalten. Um Ladungen auf der Oberfläche zu akkumulieren, ist also einerseits für die Aufladung ein hoher elektrischer Widerstand erforderlich [9, 93, 94, 95]. Andererseits wird mit zunehmendem Widerstand der Ladungsübergang zwischen den Kontaktflächen bzw. der Ladungstransport in der oberflächennahen Schicht behindert [96].

*Liesegang* und *Senn* [96] maßen den elektrischen Widerstand, die Diffusion und Penetrationstiefe der Ladungen auf PMMA-, PE- und Glas-Oberflächen. Die Penetrationstiefe der aufgebrachten Ladungen und der Ladungsdiffusionskoeffizient nahmen mit zunehmendem elektrischem Widerstand stark ab. Das heißt, dass die Beweglichkeit der Ladungsträger mit steigendem elektrischen Widerstand reduziert wurde.

Allerdings können die Aufladungsbedingungen den Einfluss des elektrischen Widerstandes ändern. So wurden in [97] durch entsprechende Isolation des Aufladungsapparates auch elektrisch leitfähige Materialien triboelektrisch aufgeladen. Eine hohe Trenngeschwindigkeit nach einer Kontaktierung kann auch zur Aufladung von Leitern führen [98].

Neben dem elektrischen Widerstand wird die **Dielektrizitätszahl** der kontaktierenden Stoffe für die Erklärung des Aufladungsvorganges genutzt. Nach der *Coehnschen* Regel lädt sich bei Berührung zweier Dielektrika jenes positiv auf, das die höhere Dielektrizitäts-

zahl besitzt. Die Höhe der Aufladung sei proportional zur Differenz ihrer Dielektrizitätszahlen [76, 77]. Mit zunehmender Dielektrizitätszahl wurde eine höhere Elektronenbeweglichkeit und dadurch ein höherer Ladungsübergang bei einem Kontakt angenommen. Der experimentell gefundene Zusammenhang gilt aber nur eingeschränkt, so dass diese Regel nicht generell angewendet werden kann [78, 79].

## 2.5.2 Atmosphärische Bedingungen

Auf die triboelektrische Aufladung hat die **relative Luftfeuchtigkeit** der die Probe umgebenden Atmosphäre einen wesentlichen Einfluss. Insbesondere hydrophile Materialien, aber auch hydrophobe Stoffe adsorbieren Wasser an ihrer Oberfläche [99 bis 102]. Es ist davon auszugehen, dass sich selbst an ausgeprägt unpolaren Kunststoffen Wasser anlagern kann [99]. Über die Rolle der angelagerten Wasserschichten auf die triboelektrische Aufladung gibt es bisher keine einheitlichen Auffassungen. Als allgemeine Tendenz gilt, dass der Oberflächenwiderstand mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit abnimmt (**Bild 14**) [91].

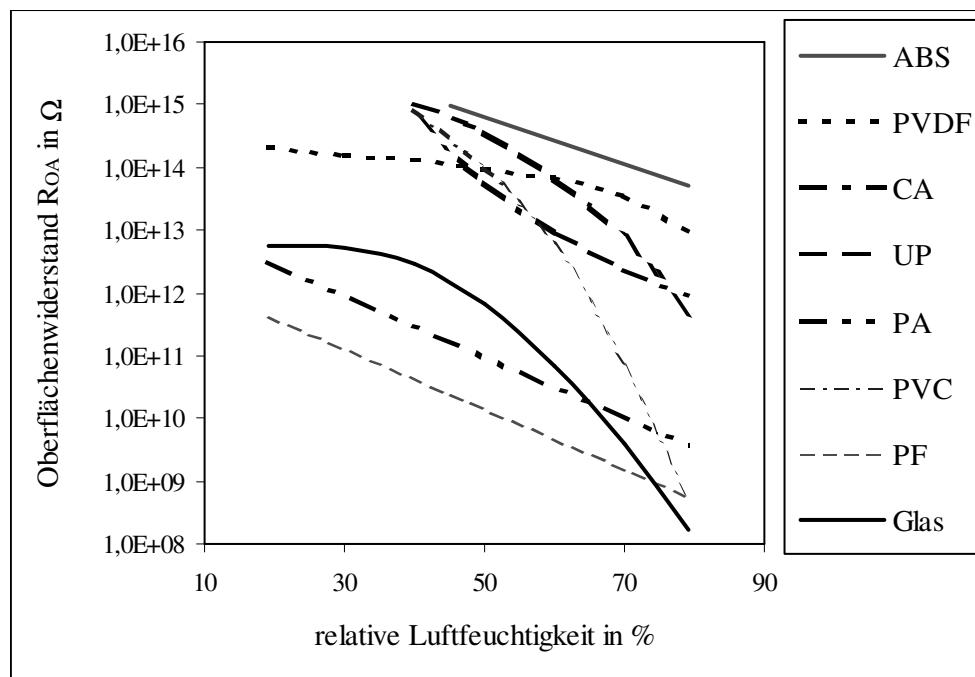


Bild 14: Abhängigkeit des Oberflächenwiderstandes von der relativen Luftfeuchtigkeit [91]

Niermöller [9] hat bei der Messung der triboelektrischen Aufladung von mineralischen Rohstoffen die Verringerung der Ladungshöhe mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit festgestellt. Das wurde mit der steigenden Leitfähigkeit der Oberfläche begründet. Auch die Ergebnisse von Kwetkus [106] bestätigten diese Tendenz. Über  $\phi = 60\%$  war der Einfluss der Luftfeuchtigkeit erheblich. Die Aufladung sank sprunghaft auf niedrige Werte. Diese Erscheinung wurde mit der Ausbildung eines Wasserfilmes begründet, der das Abfließen der Ladungen von der Kontaktfläche ermöglichte.

Die Ergebnisse von *Gibson* und *Lloyd* bzw. *Gibson* und *Harper* in [145, 146] zeigen, dass die Aufladung einer PE-Probe gegen Wolle bis  $\phi = 40\%$  unabhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit ist (**Bild 15**). Bei  $\phi > 40\%$  erfolgt eine rapide Abnahme der Ladungshöhe. Das war verbunden mit einem abnehmenden Oberflächenwiderstand der Probe.

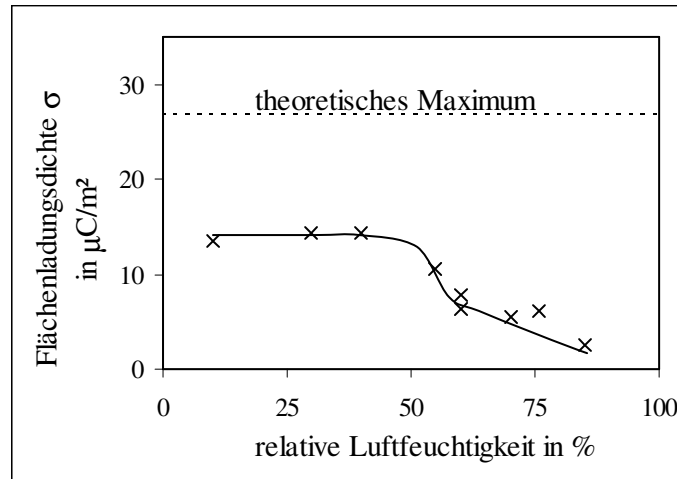


Bild 15: Aufladung von PE gegen Wolle in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit [145]

*Zimmer* [103] kontaktierte PVC mit Metallen und variierte dabei die relative Luftfeuchtigkeit. Die Erhöhung der Luftfeuchtigkeit führte zu einer linearen Abnahme der Aufladung, die er auf die Zunahme der Leitfähigkeit der Oberfläche infolge angelagerten Wassers zurückführte.

Eine zunehmende relative Luftfeuchtigkeit führte nicht immer zur Verringerung der Ladungshöhe der Kunststoffe. *Yanar* und *Kwetkus* [105] fanden bei der Trennung eines PE/PVC-Gemisches, das in einem Zyklon aufgeladen worden war, dass mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit bessere Trennergebnisse zu erzielen waren. Daraus konnte man auf eine stärkere triboelektrische Aufladung der Komponenten schließen.

*Mientkewitz* [14] stellte Zweikomponenten-Kunststoffgemische her und untersuchte systematisch ihr Aufladungsverhalten bei Variation der relativen Luftfeuchtigkeit. Es wurde deutlich, dass die Aufladung der Gemische in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit vier unterschiedlichen Tendenzen folgt. Diese bezeichnete man mit den Typen A, B, C und D (**Bild 16**). Ein Polaritätswechsel der Gemischkomponenten konnte nicht beobachtet werden.

Typ A ist durch eine hohe Aufladung charakterisiert, die von der relativen Luftfeuchtigkeit unabhängig ist. Typ B zeigt eine Verringerung der hohen spezifischen Ladung bei hohen relativen Luftfeuchten. Typ C weist eine geringe Aufladung und keinen Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf. Besonders bemerkenswert ist Typ D, wo die spezifische Ladung mit steigender Luftfeuchtigkeit zunimmt. Diese Erscheinung tritt erst bei relativen Luftfeuchten von  $\phi > 50\%$  deutlich auf und wurde bei den Gemischen PS/PE und PS/PP bzw. bei höherer Aufladungsintensität auch bei PE/PP festgestellt. Die Ursache der unter-

schiedlichen Aufladungstypen sah *Mientkewitz* in der Veränderung der aufladungsrelevanten Oberflächenzustände und nicht in der Änderung des elektrischen Widerstandes infolge des Einflusses der Luftfeuchtigkeit. Es ist allerdings anzumerken, dass der Einfluss des elektrischen Widerstandes nicht nur in Verbindung mit der Ladungsableitung sondern auch mit der Ladungsakkumulation diskutiert werden kann (s. 2.4.1).

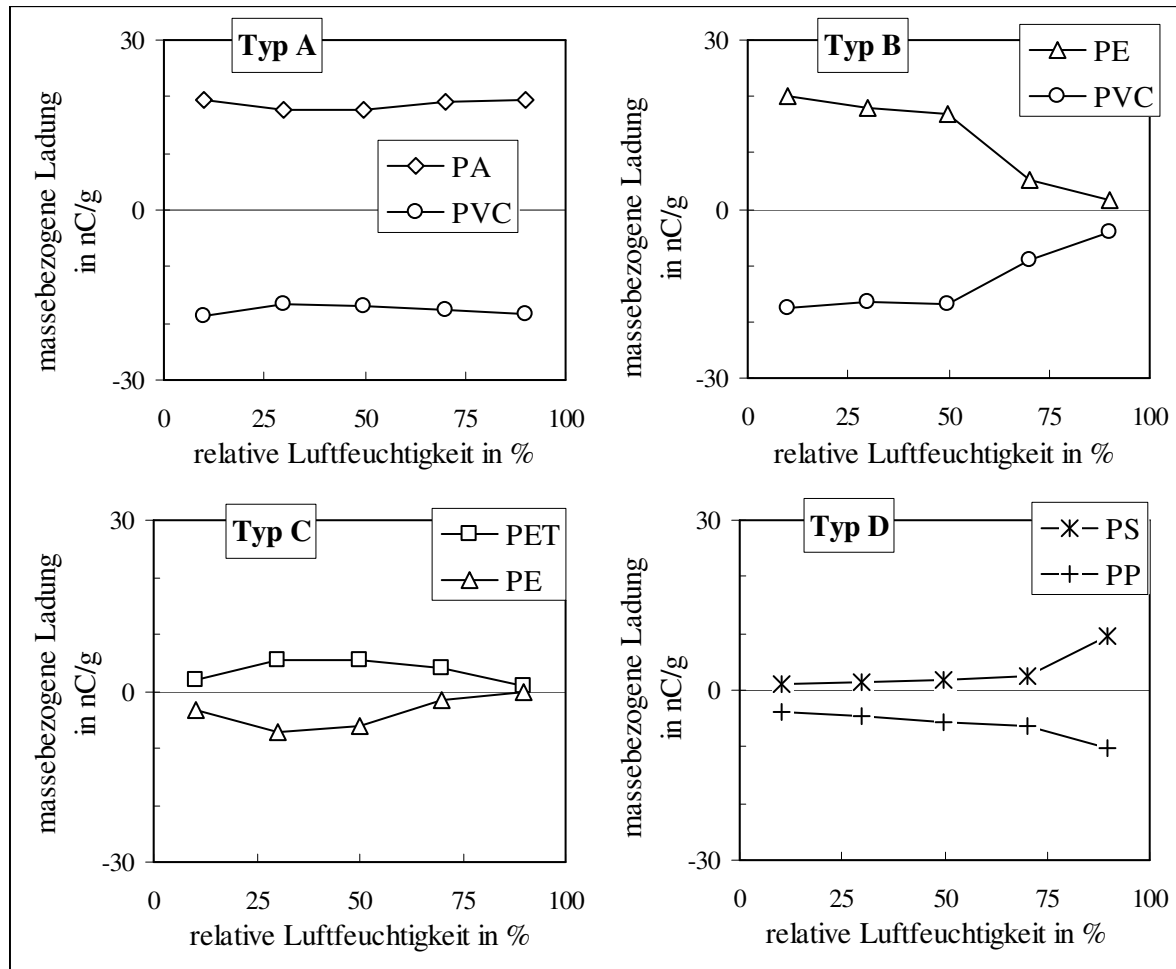


Bild 16: Abhängigkeit der Aufladung von der relativen Luftfeuchtigkeit bei Aufladung von Zweikomponenten-Gemischen [14]

In [14] wurde weiterhin gezeigt, dass die relative Luftfeuchtigkeit die **Aufladungsgeschwindigkeit** deutlich beeinflussen kann. So lud sich z. B. das PE/PVC-Gemisch (Typ B) bei höheren relativen Luftfeuchtigkeiten langsamer auf (**Bild 17**).

*Bauch* [78] lud verschiedene Kunststoff-Pulver, die als Pulverlacke eingesetzt werden, gegen PTFE auf. Dabei zeigten Kunststoffe, die ein hohes Wasseraufnahmevermögen besitzen, eine deutliche Abhängigkeit der Aufladung von der relativen Luftfeuchtigkeit. Das adsorbierte Wasser auf der PA- und PVC-Oberfläche bewirkte eine Erhöhung der triboelektrischen Aufladung. Eine Erklärung für dieses Verhalten wurde nicht angegeben.

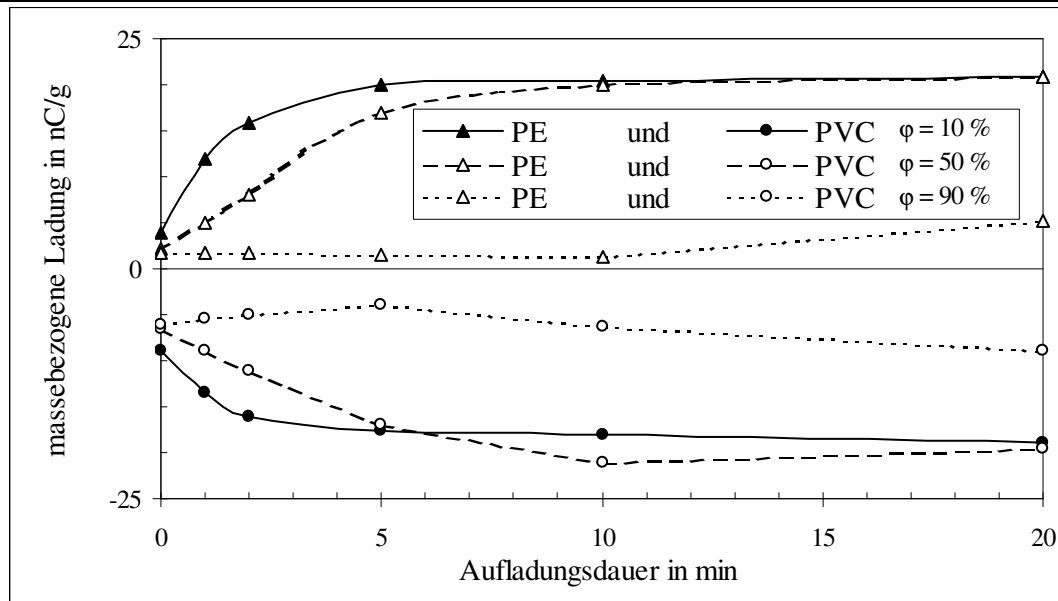


Bild 17: Abhängigkeit der Aufladung von der Aufladungszeit für PE/PVC-Gemische [14]

*Zimmer* [103] ermittelte bei Raumtemperatur für jeden der von ihm untersuchten Kunststoffe (PVC, PMMA, PET, ABS, Polyphenyloxyd) eine negative Aufladung gegen Platin. Wurde die **Temperatur** erhöht, erfolgte ein Polaritätswechsel mehrerer Kunststoffe. Die kunststoffspezifische Umschlagtemperatur lag zwischen 90 und 180 °C. Es stellte sich heraus, dass die Kunststoffe, die sich bei höheren Temperaturen positiv aufluden, Doppelbindungen besitzen ( $\pi$ - und  $\sigma$ -Bindungen). Als Ursache für den Polaritätswechsel wurden die bei höheren Temperaturen leichter aus der Kunststoffoberfläche heraustretenden  $\pi$ -Elektronen angegeben.

Nach *Kwetkus* [106] nahm die Aufladung von Kohle gegen Kupfer mit zunehmender Temperatur zu. Dies wurde auf eine Wasserdesorption oder eine Oxidation der Oberfläche zurückgeführt, die zu einer Erhöhung des Oberflächenwiderstandes führte. Von *Duba* [107] wurde beim Aufheizen von Kohle bis 110 °C eine Zunahme des Oberflächenwiderstandes von mehreren Größenordnungen gemessen.

Die Abhängigkeit der Aufladung vom **Druck** zeigte bei *Zimmer* [103] eine Korrelation mit der Durchbruchfeldstärke der Luft. Dieser Verlauf wurde auch in [106] bestätigt. Die Kurve wies gemäß dem Paschen-Gesetz [108, 109] ein Minimum auf. Die Durchbruchfeldstärke der Luft bestimmt die maximal erreichbare Ladungsdichte auf der Oberfläche. Wird diese erreicht, treten **Gasentladungen** auf, die eine weitere Aufladung verhindern (s. 2.5.3). Das Vorhandensein von **Ionen** kann die elektrische Leitfähigkeit bzw. die Durchbruchfeldstärke der Luft und damit die Höhe der triboelektrischen Aufladung verändern [97, 110].

### 2.5.3 Gasentladungen

Sammeln sich viele Ladungsträger auf der Oberfläche eines Körpers an, sodass die Durchbruchfeldstärke des umgebenden Mediums erreicht wird, erfolgt eine Ionisation des

umgebenden Mediums und die Ladungsträger fließen ab. Diese Erscheinung bezeichnet man als Gasentladung.

Der Ladungszustand eines Körpers wird üblicherweise mittels der Flächenladungsdichte charakterisiert. Zwischen Flächenladungsdichte und der elektrischen Feldstärke an der Oberfläche besteht der folgende Zusammenhang:

$$\sigma = \epsilon_0 E \quad (7)$$

Die maximal erreichbare Flächenladungsdichte wird durch die Durchbruchfeldstärke

$$\sigma_{\max} = \epsilon_0 E_D \quad (8)$$

begrenzt. Die Durchbruchfeldstärke eines Gases hängt von mehreren Faktoren ab, z. B. von der Art des Gases, dem Gasdruck und der Krümmung der Körperoberfläche [9, 10, 108]. In Luft geht man bei Normaldruck von ca. 3 MV/m für die Durchbruchfeldstärke aus. Daraus resultiert eine maximale Flächenladungsdichte von ca.  $2,65 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ . Das entspricht einem Verhältnis von einem Ladungsträger pro ca.  $10^6$  Oberflächenatomen [10].

Auch **Partikelgröße und -form** beeinflussen die Durchschlagfestigkeit. In einem stark inhomogenen elektrostatischen Feld, wie z. B. in der Nähe von Spitzen oder bei Teilchen mit geringem Durchmesser, wo stärkere Krümmungen vorhanden sind, ist mit einer höheren Durchbruchfeldstärke der Luft und folglich mit höheren Flächenladungsdichten zu rechnen [32, 108].

Wie stark Gasentladungen die triboelektrische Aufladung beeinflussen können, zeigen die Ergebnisse von Kwetkus [106, 111, 121]. Es wurden verschiedene Materialien, wie Epoxidharz, Kohle und Silizium, bei unterschiedlichen Gasdrücken gegen Metall aufgeladen. In **Bild 18** ist beispielhaft die Aufladungskurve von Epoxidharz gegen Messing dargestellt.

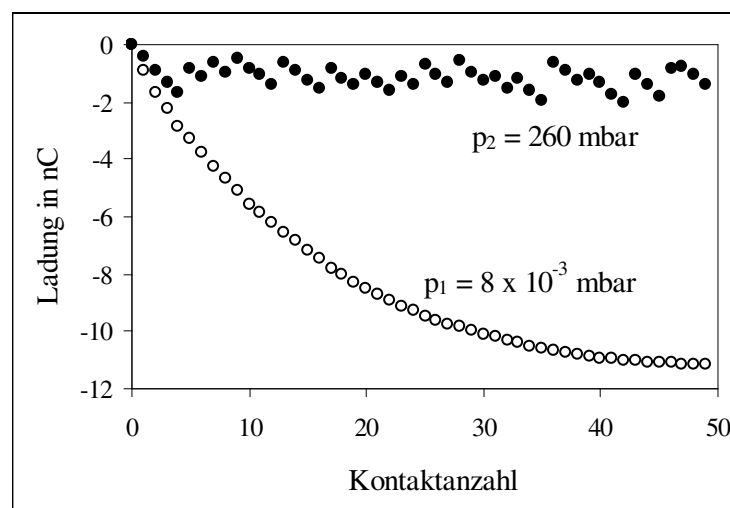


Bild 18: Aufladung von Epoxidharz gegen Messing in Stickstoffatmosphäre bei  $p_1 = 8 \times 10^{-3} \text{ mbar}$  und  $p_2 = 260 \text{ mbar}$  [111]

Ein Gleichgewichtszustand stellte sich während der Einzelkontaktzeit von 1,9 s noch nicht ein. Während in Vakuum die Ladungshöhe bei wiederholtem Kontakt zunahm und sich einem Sättigungszustand annäherte, sank sie bei höherem Druck nach wiederholter Kon-

taktierung immer wieder ab. Diese Erscheinung wurde mit der Verringerung der Durchbruchfestigkeit der die Probe umgebenden Atmosphäre und dadurch auftretende Gasentladungen erklärt.

Durch die von *Kwetkus* [111] beobachteten Entladungserscheinungen weist die Aufladungskurve eine typische Sägezahnform auf. Diese wurde auch bei der Aufladung von Kalkspat gegen Metall und der Aufladung eines Quarz/Kalkspat-Gemisches in einer Wirbelschicht festgestellt [112].

## 2.5.4 Kontaktierungsbedingungen

*Lowell* [45] untersuchte den Einfluss der **Kontaktierungsart** auf die Aufladung von Kunststoffen gegen Metall bei Einzelkontakt, wiederholtem Kontakt und Reibungskontakt. Während beim Einzelkontakt die Metallart keinen signifikanten Einfluss auf die Ladungshöhe hatte, korrelierte die Aufladung bei wiederholtem Kontakt und bei Reibungskontakt mit der Elektronenaustrittsarbeit der Metalle. In [54] wird dagegen von einer Korrelation sowohl bei Einzel- als auch bei Reibungskontakt berichtet.

Während beim Einzelkontakt eine Erhöhung der Kontaktzeit auf die Ladungshöhe keinen Einfluss hatte, wurde mit zunehmender **Kontaktanzahl** an der gleichen Stelle eine ständige Zunahme der Aufladung bis zum Erreichen eines Sättigungszustandes gemessen. *Lowell* vermutete die Ursache der Ladungsakkumulation in der mechanischen Beanspruchung (Deformation) der Oberfläche [45], was er aber später widerlegte [113]. In [66] erklärte er diese Erscheinung mit einem Materialtransport zwischen den Kontaktflächen. Dieses Phänomen wurde auch in weiteren Veröffentlichungen beschrieben und intensiv nach der Ursache gesucht [51, 53, 114, 115, 116, 117]. *Fuhrmann* und *Hoffmann* [114] erklärten die Ladungsakkumulation bei wiederholter Kontaktierung durch die Ladungserhöhung in der Volumenphase. *El-Kazzaz* und *Rose-Innes* [51] vermuteten, dass das Metall die Kunststoffoberfläche nicht immer an derselben Stelle berührte. *Yu* und *Watson* [116] konnten die Deformation der Kunststoffoberfläche als Ursache der Ladungsakkumulation ausschließen. Eine gesicherte Erklärung des Phänomens existiert bislang noch nicht.

*Wählin* und *Bäckström* [42] variierten die **Intensität** der Aufladung bei Reibungskontakt durch Änderung der Geschwindigkeit zwischen den Kontaktpartnern und bestimmten eine Zunahme der Aufladung mit zunehmender Geschwindigkeit. Wurde die Normalkraft auf die Kontaktfläche erhöht, konnte man eine weitere Ladungserhöhung erzielen. Dass eine intensivere Kontaktierung zu einer höheren Aufladung führt, wurde auch von *Zimmer* [103] bestätigt. Kritisch ist anzumerken, dass die Reibung eine Temperaturerhöhung der Kontaktfläche verursacht, die eine Änderung der elektrischen Eigenschaften bewirkt.

Den Einfluss der Intensität der Kontaktierung ermittelte *Mientkewitz* [14] in einer Schüttelapparatur, wobei die Amplitude der Schwingungen variiert wurde. Es konnte gezeigt werden, dass die Kunststoffgemische, die sich bei geringer Amplitude schwach aufladen, durch Erhöhung der Kontaktierungsintensität höhere Ladungen erhalten können. Durch intensivere Kontaktierung nähern sich die Kontaktflächen einander mehr an, was den

Ladungstransfer begünstigt. Eine Vergrößerung der Kontaktfläche durch mechanische Beanspruchung (Deformation) wird als Ursache angegeben. Besonders bemerkenswert ist das Aufladungsverhalten des PE/PP-Gemisches, das sich in Verbindung mit einer höheren relativen Luftfeuchtigkeit bei größerer Intensität stärker auflädt (**Bild 19**).

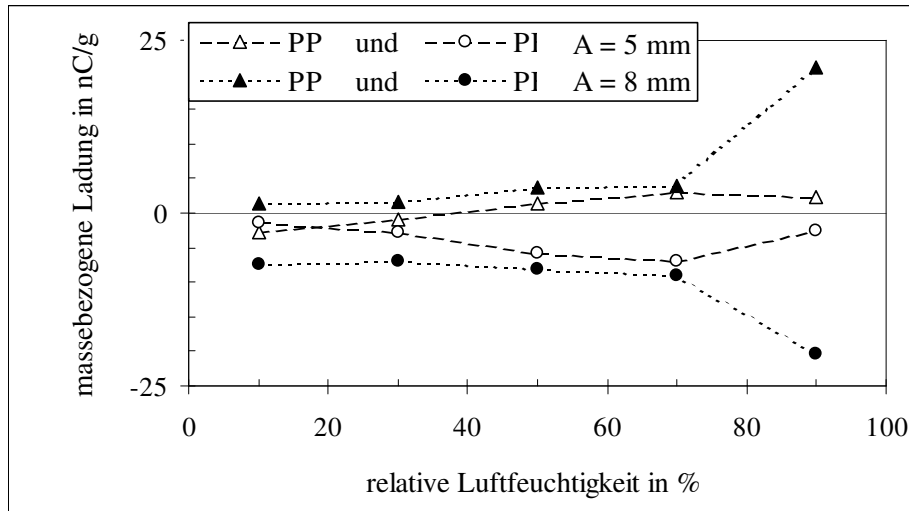


Bild 19: Abhängigkeit der Aufladung des PP/PE-Gemisches von der relativen Luftfeuchtigkeit bei unterschiedlichen Aufladungsintensitäten [14]

A: Amplitude der Schüttelapparaturbewegung

*Coste* und *Pechery* [118] luden Kunststoffe gegen Metall mittels Reibungskontakt auf und fanden drei Typen des Aufladungsverhaltens (**Bild 20**).

Typ I ist durch die Zunahme der Aufladung bis zum Erreichen eines konstanten Wertes gekennzeichnet. Dieses Aufladungsverhalten trat dann auf, wenn die relative Geschwindigkeit zwischen den Kontaktflächen gleich Null war (reiner Rollkontakt). Bei Typ II nimmt die Ladung bis zu einem gewissen Wert zu, dann erfolgt ein Polaritätswechsel und ein Gleichgewichtszustand stellt sich ein. Dies wurde beobachtet, wenn die Reibungsgeschwindigkeit, die Kraft zwischen den Kontaktflächen bzw. die relative Luftfeuchtigkeit einen kritischen Wert überstiegen. Unterhalb dieser Werte wurde Typ III festgestellt. Die auftretende Reibung zwischen den Kontaktflächen kann zu einer lokalen Temperaturerhöhung führen, die eine Änderung der Oberflächeneigenschaften zur Folge hat [10, 103].

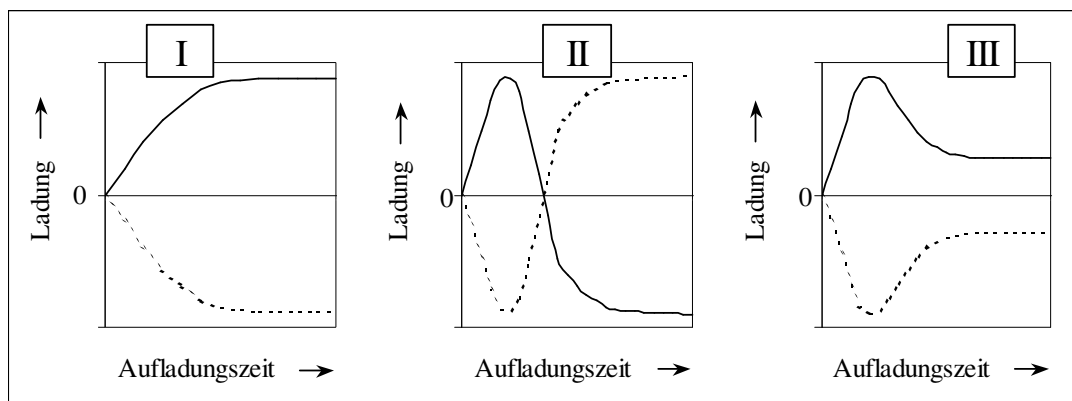


Bild 20: Ladung in Abhängigkeit von der Aufladungszeit [118]



### 2.5.5 Modifizierung der Oberfläche

Eine gezielte Beeinflussung der Kunststoffaufladung durch eine Behandlung der Oberfläche hat sich neben der Kunststoffsortierung auch in der Textilindustrie [75, 94], bei der Elektrophotographie [74, 82, 84, 85, 119] und im Bereich von ESD-Schutzmaßnahmen [91] eingeführt.

Es ist allgemein anerkannt und gesichert, dass bei der triboelektrischen Aufladung nur die Oberflächenschicht der Kunststoffe beteiligt ist. Die für die Aufladung verantwortlichen Ladungsträger dringen nur bis ca. 30 nm tief in den Kunststoff ein [122]. Durch eine zusätzliche Oberflächenbehandlung oder eine Zumischung von Additiven kann das ursprüngliche Aufladungsverhalten der Kunststoffe deshalb stark verändert werden [80 bis 87].

*Brück* [67] behandelte die Kunststoffe PC und CA mit Fluortensiden. Diese Behandlung führte zur Verschiebung ihrer Position in der TER in Richtung des negativen Endes, wo die halogenierten Kunststoffe eingeordnet sind. *Brück* vermutete, dass die Perfluorgruppen des angereicherten Tensides die Adsorption von Ionen, besonders von  $H^+$ , verhindern. Eine Behandlung von CA, PVA, ABS, PS und PE mit Schwefelsäure bewirkte ebenfalls eine Verschiebung der Position dieser Kunststoffe in Richtung des negativen Endes der TER. Auch durch eine Korona-Behandlung wurde eine Änderung der Position von PC, ABS, PS PVDF und PVC in die gleiche Richtung erzielt. Nach bestimmter Lagerungszeit veränderte sich allerdings die Position wieder in Richtung der ursprünglichen Lage, was auf die Unbeständigkeit der Korona-Behandlung hindeutet.

*Lowell* und *Brown* berichteten [80], dass sich halogenierte Kunststoffe im Gegensatz zu unbehandelten Proben gegen Metall negativer aufladen. Die Korrelation zwischen der Aufladung der behandelten Proben und der Elektronenaustrittsarbeit der Metalle wurde dabei deutlich schwächer.

*Mientkewitz* [14] behandelte Zweikomponenten-Kunststoffgemische mit verschiedenen oberflächenaktiven Reagenzien und untersuchte anschließend die Änderung ihres Aufladungsverhaltens. Dabei gelang es, Gemische, die ohne Behandlung nur eine geringe Ladung zeigten, stark aufzuladen.

*Schultz* [15] hat ein PP/PE-Gemisch nach Aufladung in einer Wirbelschicht in einem elektrostatischen Feld getrennt. Dabei fanden eine Reihe von Reagenzien für eine Oberflächenbehandlung der Kunststoffe Verwendung, mit denen unterschiedliche Ladungserhöhungen erzielt werden konnten. Dabei konnte eine Behandlung mit wässrigen Nigrosinlösungen die Trennung deutlich verbessern.

### 3 Versuchsmaterialien

Für die Grundlagenuntersuchungen wählte man Kunststoffe aus, die keine bzw. nur geringe Anteile an Additiven besitzen. Neben den unpolaren Polyolefinen (PE, PP, PB, PMP) wurden gezielt auch Kunststoffe mit verschiedenen polaren Gruppen verwendet (**Tabelle 4**). Es fanden mittels Kalt- und Heißabschlag aus Neumaterial hergestellte Granulate Verwendung. Sie wurden von verschiedenen Herstellern und Lieferanten bezogen.

Tabelle 4: Versuchsmaterialien

Kunststoff	Abkürzung	mittlere Korngröße	Handelsname	Hersteller/Lieferant
Polyethylen	PE	4,5 mm	Mirathen AL 21 FA	Buna Sow Leuna
Polypropylen	PP	3,6 mm	Daplen PP KS 10	PCD Petrochemie Danubia
Poly(1-buten)	PB	3,5 mm	Tafmer BL 3450	Mitsui Chemicals Europe GmbH
Poly(4-methyl-1-penten)	PMP	2,7 mm	TPX RT18	Mitsui & Co. Deutschland GmbH
Polyamid-12	PA	3,5 mm	Vestamid L 1600	Degussa AG
Polystyrol	PS	2,8 mm	PS 158 K	BASF
Polyvinylchlorid	PVC	3,6 mm	Decelith 23002	Eilenburger Compound Werk GmbH
Polyethylen-terephthalat	PET	2,3 mm	Polyclear T 86	Hermann ter Hell
Polyoxymethylen	POM	3,2 mm	Ultraform N 2320003	BASF
Polymethylmethacrylat	PMMA	2,5 mm	Plexiglas G7	Ter Hell Plastic GmbH

Die chemischen Strukturformeln der Kunststoffe sind in **Bild 21** zusammengefasst. Um den Einfluss der Additive im Kunststoff auf die triboelektrische Aufladung verdeutlichen zu können, wurden gezielt verschiedene PVC-Sorten hergestellt. Ihre detaillierte Charakterisierung erfolgt in Kapitel **6.2.2.5**.

Für die Berechnung der Flächenladungsdichte nach der triboelektrischen Aufladung wurde die spezifische Oberfläche der Kunststoffgranulate ermittelt. Die Granulate hatten eine regelmäßige Form. Lichtmikroskopische Untersuchungen zeigten eine porositätsfreie, glatte Oberfläche. So konnte anhand der gemessenen Geometrie der Einzelkörner die Oberfläche berechnet werden. Zur Bestimmung der Einzelkornmasse wurden aus der Kunststoffschüttung ca. 15 g Material herausgeviertelt und die Anzahl der Teilchen bestimmt. Daraus wurde die Einzelkornmasse berechnet (**Tabelle 5**).

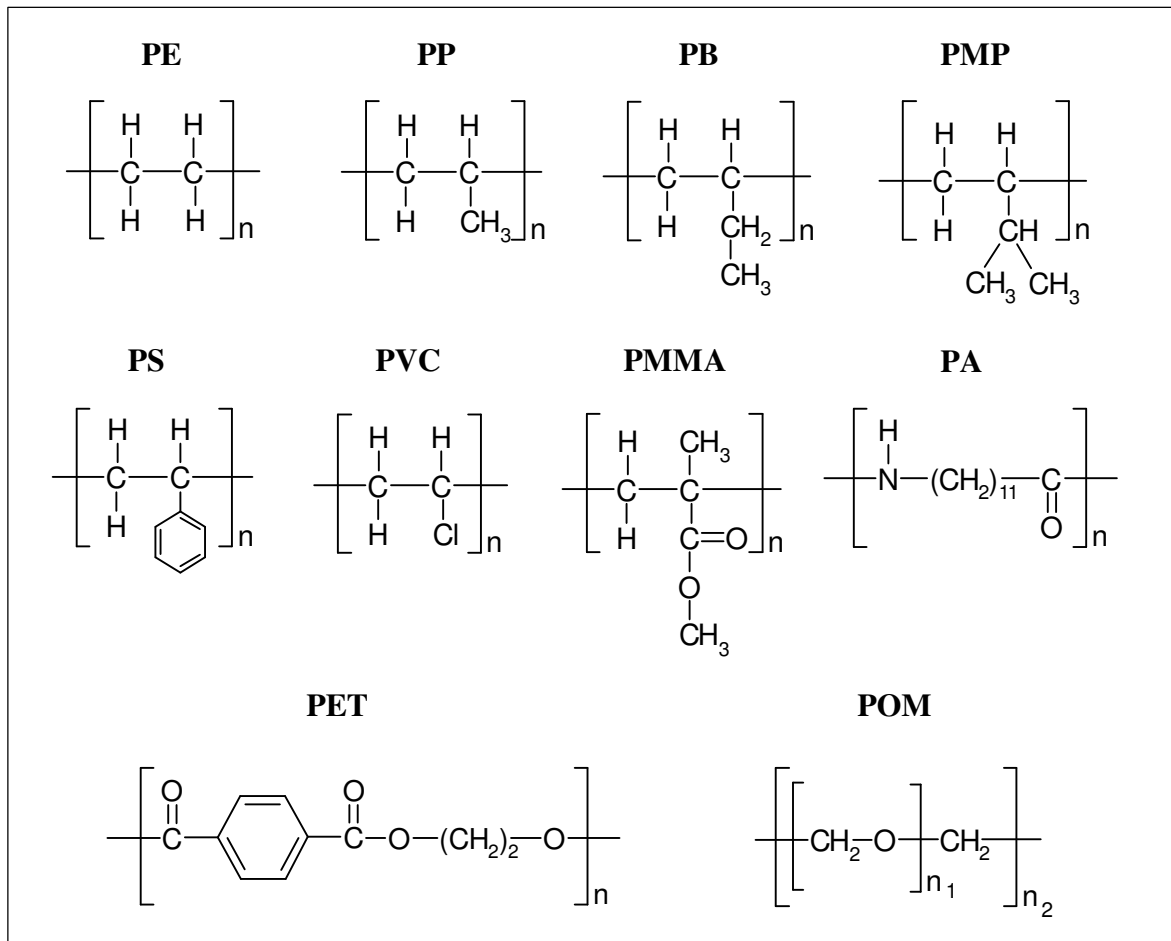


Bild 21: Chemische Strukturformeln der untersuchten Kunststoffe

Tabelle 5: Kornmasse und mittlere spezifische Oberfläche der untersuchten Kunststoffe

Kunststoff	mittlere Einzelkornmasse in $10^{-3}$ g	mittlere Oberfläche eines Korns in $\text{mm}^2$	mittlere spezifische Oberfläche in $\text{mm}^2/\text{g}$
Polyethylen	38,2	68,7	1798
Polypropylen	27,5	48,4	1760
Poly(1-buten)	19,9	38,1	1915
Poly(4-methyl-1-penten)	13,6	35,9	2640
Polyamid-12	20,5	42,5	2073
Polystyrol	17,4	36,0	2069
Polyvinylchlorid	45,2	76,4	1690
Polyethylenterephthalat	16,8	29,2	1738
Polyoxymethylen	22,8	30,9	1355
Polymethylmethacrylat	17,5	36,2	2069

Die Dichte der Kunststoffe wurde am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik der TU Bergakademie Freiberg pyknometrisch bestimmt (**Tabelle 6**).

Tabelle 6: Dichte der Kunststoffe

Kunststoff	Dichte der Kunststoffe in kg/m <sup>3</sup>
Polyethylen	920
Polypropylen	870
Poly(1-buten)	900
Poly(4-methyl-1-penten)	840
Polyamid-12	1010
Polystyrol	1060
Polyvinylchlorid	1320
Polyethylenterephthalat	1400
Polyoxymethylen	1410
Polymethylmethacrylat	1190

Für die Bearbeitung spezieller Aufgabenstellungen wurden die Granulate zu Pulvern gemahlen, zu Platten spritzgegossen oder als Schmelz- bzw. Lösefilme eingesetzt. Das Mahlen der Granulate erfolgte kryotechnisch in einer Prallmühle der Firma Microtec am Forschungsinstitut für Leder- und Kunststoffbahnen Freiberg. Die Spritzgußplatten wurden von BSL Olefinverbund GmbH (Werk Schkopau) mit einer Spritzgussmaschine Typ ES 200-50 HL der Firma ENGEL und die PVC-Platten mit der Spritzgussmaschine Typ KuASY 410/100-II der Firma VEB Plastmaschinenwerk Freital gefertigt. Die Schmelz- und Lösefilme stellte das Institut für Polymerforschung Dresden her. Die Probenpräparation erfolgte dabei so, dass die chemische Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien nicht verändert wurde. Um dies zu kontrollieren, wurden die Kunststoffproben in jeder Präparationsform mittels Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie (XPS) untersucht (s. **4.1**).

## 4 Charakterisierung der Kunststoffoberfläche

### 4.1 Chemische Zusammensetzung

Für die Untersuchungen der chemischen Zusammensetzung der Kunststoffoberflächen in allen genutzten Präparationsformen wurden röntgenphotoelektronenspektroskopische Untersuchungen (XPS) durchgeführt <sup>\*)</sup>. Diese Methodik ermöglicht eine qualitative und quantitative Bestimmung der elementaren Zusammensetzung der Oberflächenregion. Die Informationstiefe beträgt für Kunststoffe methodenbedingt bis ca. 7 nm [124]. Die Nachweisgrenze liegt bei ca.  $10^5$  Atomen/ $\mu\text{m}^2$  [90].

Bei der Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie werden die Elektronen, die sich an der Oberfläche befinden, mit Photonen einer Röntgenquelle in Vakuum angeregt und aus den Elektronenhüllen der Atome emittiert. Anschließend werden die photoemittierten Elektronen nach ihrer Energie selektiert und ihre Anzahl mit einem Analysator gemessen (**Bild 22**). Nimmt man an, dass die elektronische Struktur des Moleküls während des Emissionsprozesses erhalten bleibt, entsprechen die Ionisierungsenergien den Bindungsenergien der Elektronen. Die kinetische Energie der emittierten Elektronen resultiert aus der Differenz der Energie der Röntgenstrahlung und der Bindungsenergie:

$$E_{\text{kin}} = h\nu - E_{\text{B}} \quad (9)$$

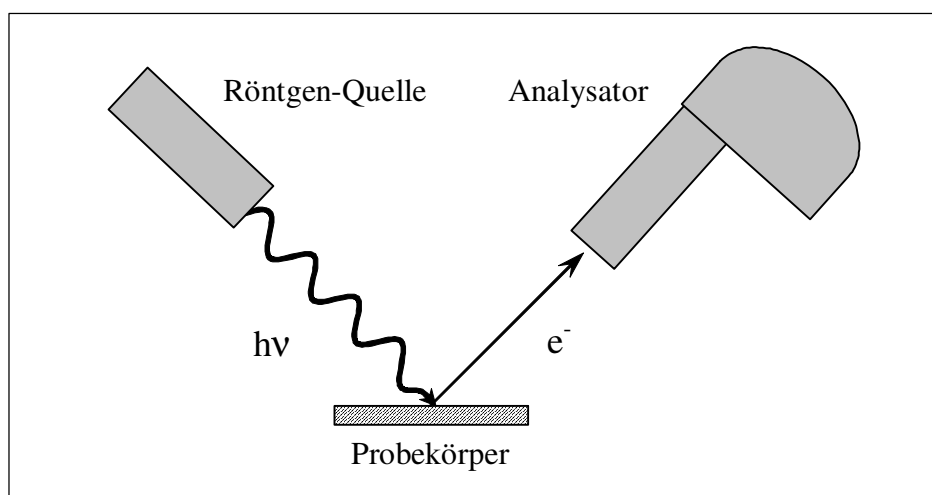


Bild 22: Prinzip der Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie (XPS), schematisch

Für die Untersuchungen wurden zwei Spektrometer – Typ ESCA Lab 220i der Firma Vacuum Generator und Typ Axis Ultra von der Firma Kratos Analytical – verwendet. Als primäre Röntgenstrahlung wurde nichtmonochromatisierte Mg-K $\alpha$ - bzw. monochromati-

<sup>\*)</sup> Die XPS-Untersuchungen wurden von Dr. F. Simon (Institut für Polymerforschung Dresden) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 285, Teilprojekt B9, der DFG durchgeführt.

sierte Al-K $\alpha$ -Strahlung benutzt. Die Quellen hatten eine Primärleistung von 300 W bei 15 kV. Die Charakterisierung der Bindungszustände und die Elementaranalyse erfolgte durch Vergleich der erhaltenen Spektren mit tabellierten Literaturwerten mittels spezieller Computerprogramme.

Es konnte nachgewiesen werden, dass die chemische Zusammensetzung der Kunststoffoberfläche – ausgenommen PVC – der aus der Strukturformel erwarteten weitestgehend entspricht. Bei den Polyolefinen und bei PS wurde in den Oberflächenregionen Sauerstoff nur in Spuren nachgewiesen. Dieser stammte z. T. aus Verarbeitungshilfsmitteln (bei PB), die durch die Anwesenheit von Silizium identifizierbar waren, oder es handelte sich um Oxidationsprodukte der Materialien. Für die restlichen Kunststoffe (PA, PET, PMMA) wurden keine Verunreinigungen an der Oberfläche gefunden.

Die PVC-Oberfläche enthält neben den aus der Strukturformel bekannten Elementen Kohlenstoff und Chlor, auch eine erhebliche Menge von Sauerstoff und Zinn (**Bild 23**).

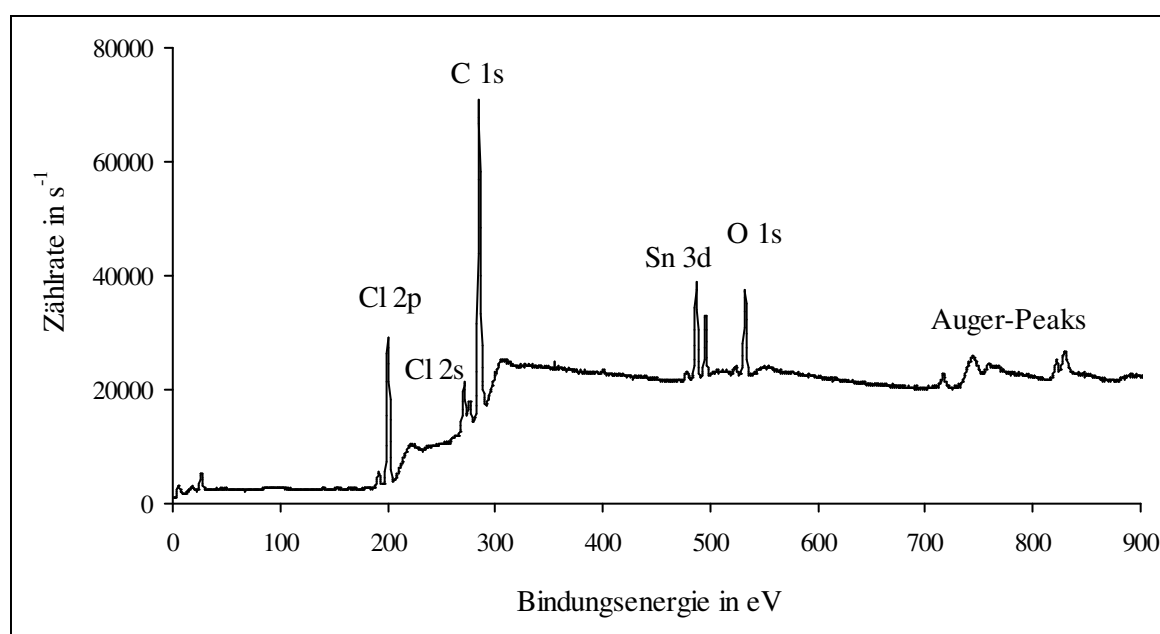


Bild 23: XPS-Übersichtsspektrum von PVC

Nach Herstellerangaben wurde dem PVC ein zinnhaltiger Stabilisator gegen Abbaureaktionen zugesetzt. Der radikalische Abbau des Chlors im PVC und der anschließende Einbau des Sauerstoffs unter atmosphärischen Bedingungen ist aus der Literatur bekannt [123]. Ein Teil des Sauerstoffs könnte durch den Zinnstabilisator eingebracht worden sein [90].

POM konnte mittels XPS nicht charakterisiert werden, weil die Röntgenstrahlung thermisch induzierte Reaktionen verursachte (Entstehung flüchtiger Abbauprodukte).

Die untersuchten Kunststoffe unterschieden sich trotz unterschiedlicher Präparationstechniken (Granulat, Pulver, Folie, Spritzgussplatte) nicht in ihrer chemischen Zusammensetzung.

## 4.2 Wasserdampfadsorption

Die Ergebnisse in der Literatur haben gezeigt, dass die triboelektrische Aufladung durch die relative Luftfeuchtigkeit bzw. das an der Kunststoffoberfläche angelagerte Wasser stark geprägt werden kann (s. 2.5.2). Zur Charakterisierung der Adsorptions- und Desorptionsvorgänge an der Kunststoffoberfläche wurden Wasserdampfadsorptions-Isothermen aufgenommen und die Dicke der adsorbierten Wasserschicht gemessen \*).

Die Wasserdampf-Adsorptionsisothermen wurden mit einem volumetrisch und einem gravimetrisch arbeitenden Gerät aufgenommen. Bei dem volumetrisch arbeitenden Gerät der Fa. Porous Materials Inc. (Ithaca, USA) wird bei konstanter Temperatur ein definiertes Volumen an Wasserdampf im Probegefäß unter einem Druck  $p$  erzeugt. Durch Adsorption des Wasserdampfes an der Kunststoffoberfläche verringert sich der Druck um  $\Delta p$ . Aus der Druckänderung kann die adsorbierte Wassermenge ermittelt werden. Mit dem gravimetrisch arbeitenden Gerät, Typ IGA-002 der Fa. HIDEN Analytical (Warrington, England), wird bei einer gewählten relativen Luftfeuchtigkeit die adsorbierte Wasserdampfmenge mit einer Mikrowaage gemessen. Die Ergebnisse beider Messmethoden korrelierten sehr gut.

Zur Bestimmung der Dicke adsorbierter Wasserschichten auf der Kunststoffoberfläche wurde die Ellipsometrie verwendet. Dafür stand ein Ellipsometer Typ VASE M-44 der Fa. J. A. Woollam Co. Inc. (Lincoln, Nebraska) mit einem im Eigenbau hergestellten Befeuchtungsapparat zur Verfügung.

Das Messprinzip der Ellipsometrie beruht auf der Änderung des Polarisationszustandes einer Lichtwelle durch Reflexion an einem Schichtsystem. Den prinzipiellen Aufbau eines Ellipsometers zeigt **Bild 24**.

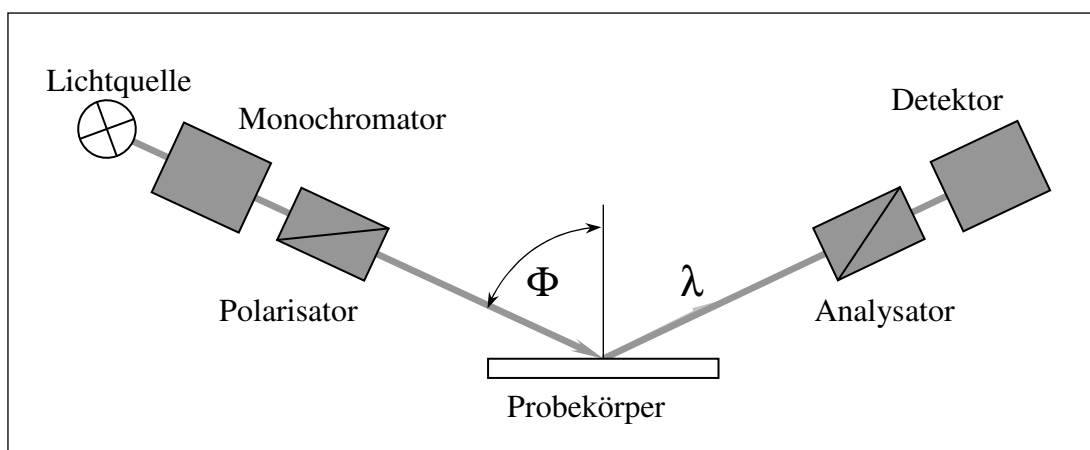


Bild 24: Prinzipieller Aufbau eines Ellipsometers, schematisch

\*) Diese Untersuchungen wurden von Dr. V. Albrecht (Institut für Polymerforschung Dresden) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 285, Teilprojekt B9, der DFG durchgeführt.

Die Änderung des Polarisationszustandes bei der Wellenlänge  $\lambda$  und dem Inzidenzwinkel  $\Phi$  wird durch folgende komplexe Zahl beschrieben:

$$\rho(\lambda, \Phi) = \tan \Psi \cdot \exp(i \cdot \Delta) \quad , \quad (10)$$

mit  $\Psi$  und  $\Delta$  als Ellipsometriewinkel, die aus dem Polarisator- und Analysatorwinkel zu bestimmen sind [125]. Die Anwendung der Fresnelformeln [125] bietet einen eindeutigen Zusammenhang zwischen einem vorgegebenen Schichtmodell und den dazugehörigen Ellipsometriewinkeln  $\Psi$  und  $\Delta$  [126].

Die Ellipsometriewinkel wurden im Spektralbereich 428 - 765,5 nm (44 diskrete Wellenlängen) und für drei Inzidenzwinkel (65°, 70°, 75°) bestimmt. Die Interpretation der erhaltenen Messkurven für  $\Psi$  bzw.  $\Delta$  durch ein geeignetes Modell und die Ermittlung der Schichtdicke erfolgte mit einer speziellen Software (WVASE32) der Fa. J. A. Woollam Co. Inc. (Lincoln, Nebraska).

Die erhaltenen Wasserdampf-Adsorptionsisothermen zeigt **Bild 25**. Das Wasseraufnahmevermögen der Polyolefine sowie von PS, PET und PVC ist niedrig und liegt unter 0,2 %. PA, POM und PMMA nehmen deutlich mehr Wasser auf. Die aufgenommene Wassermenge steigt erwartungsgemäß mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit. Wurde die Messzeit verlängert, erhöhten sich die Werte infolge der Bildung von Quellschichten an der Kunststoffoberfläche.

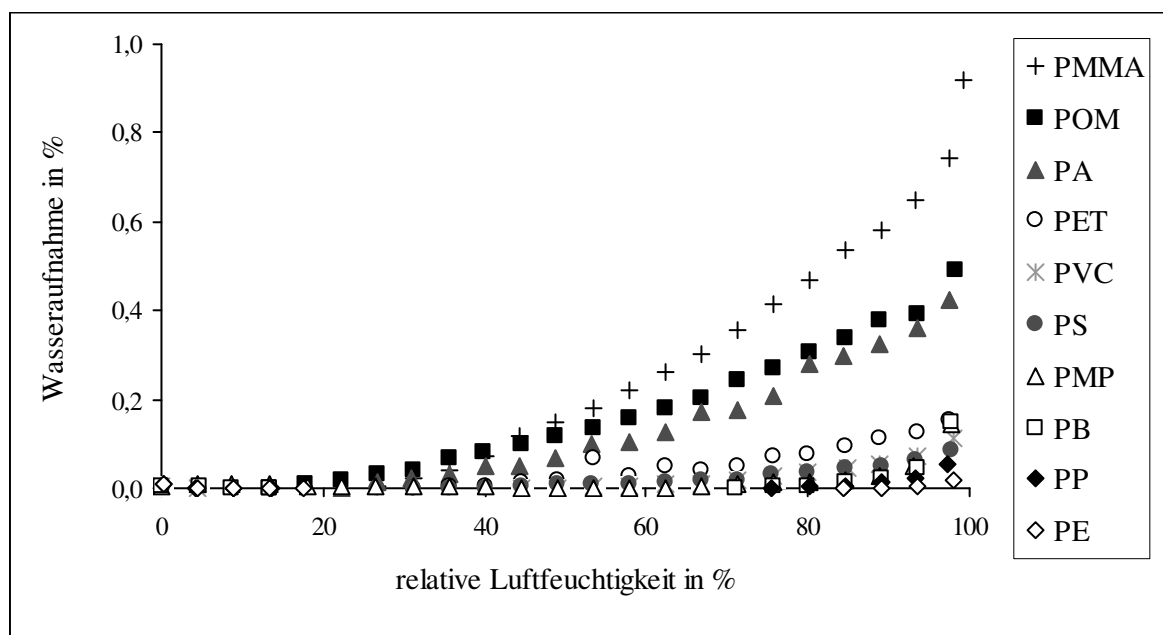


Bild 25: Wasserdampf-Adsorptionsisothermen der Kunststoffgranulate

Die Gleichgewichts-Wasserdampfadsorptions- und -desorptionsisothermen zeigen eine ausgeprägte Hysterese bei Kunststoffen mit hohem Wasseraufnahmevermögen (**Bild 26**). Dieses Verhalten wird auf die Ausbildung wasserhaltiger Quellschichten zurückgeführt.



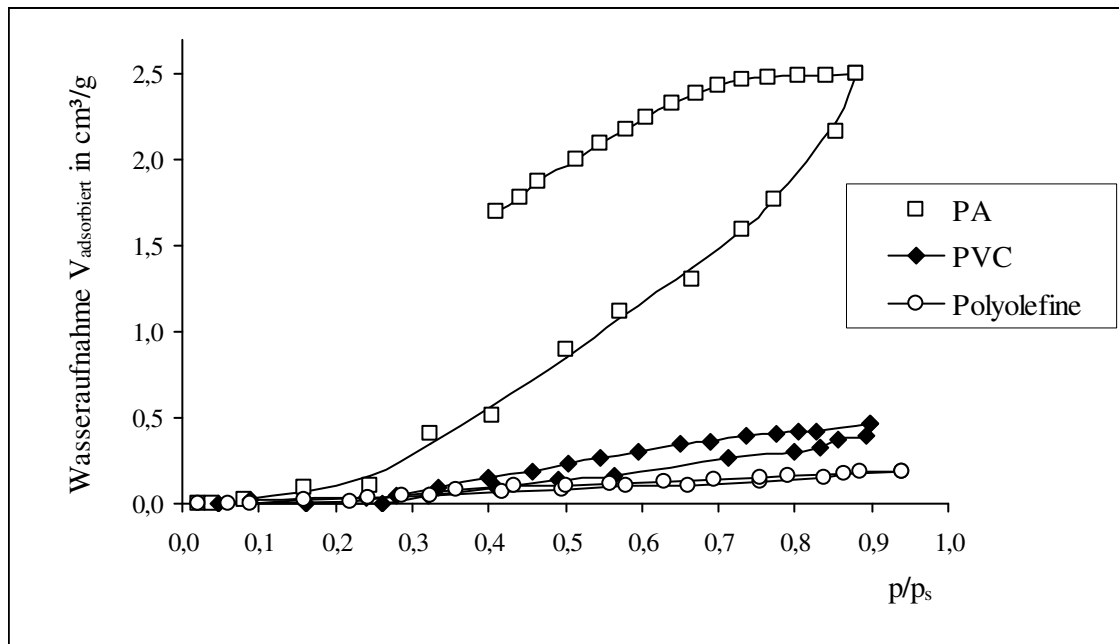


Bild 26: Gleichgewichts-Wasserdampfadsorptions- und -desorptionsisothermen von ausgewählten Kunststoffpulvern

Von ausgewählten Kunststoffen wurden mittels Spin-Coatings geschlossene dünne Filme auf einem Siliciumwafer aufgebracht. Von diesen ermittelte man in einer Feuchtekammer bei Variation der relativen Luftfeuchtigkeit die Dicke der adsorbierten Wasserschicht mittels Ellipsometrie (**Bild 27**).

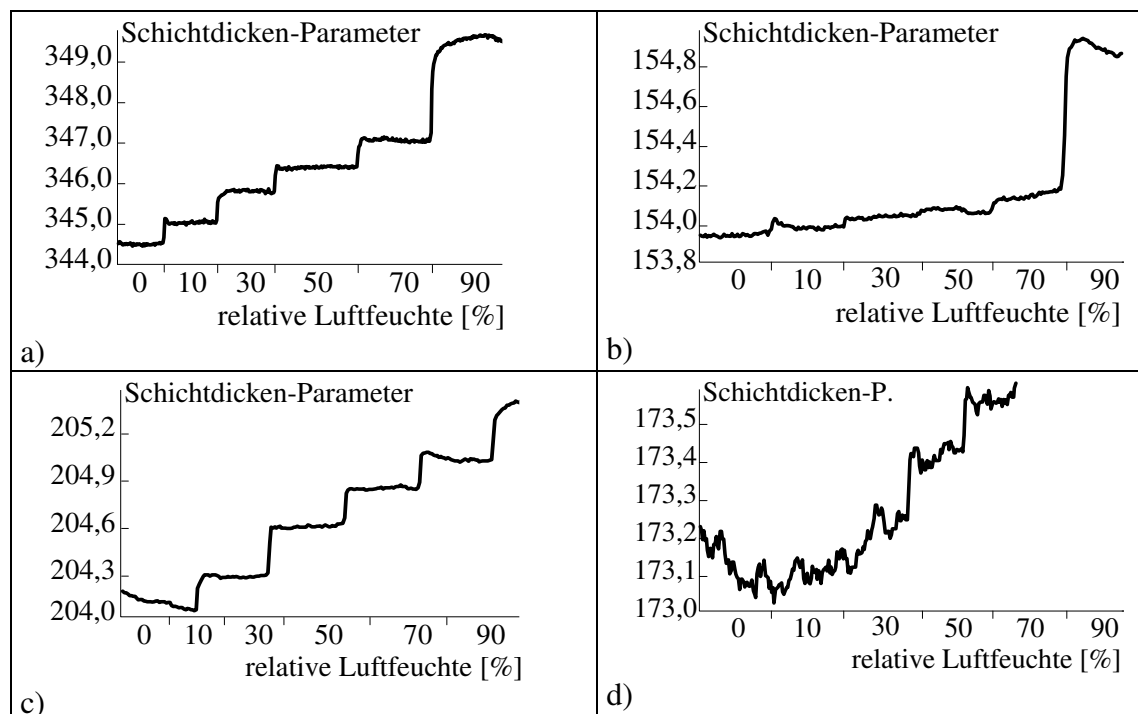


Bild 27: Schichtdicke von Wasserfilmen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit an ausgewählten Kunststoffproben

(a) PA, (b) PS, (c) PET, (d) PVC

(Die Schichtdickenparameter-Differenz entspricht der Filmdicke in nm)

Die Ergebnisse korrelieren mit denen der Wasserdampfadsorption. Bei PS ändert sich die Schichtdicke bis  $\phi = 70\%$  nur geringfügig. Zwischen 70 und 90 % relativer Luftfeuchtigkeit kommt es zu einer sprunghaften Zunahme der Wasserschichtdicke. Es wird angenommen, dass sich an der PS-Oberfläche keine Quellschicht ausbildet. Vermutlich zerreißt oberhalb  $\phi = 70\%$  der dünne Wasserfilm und es kommt durch Kondensation des Wasserdampfes zur Tropfenbildung [99].

An der PA- und PET-Oberfläche nimmt die Dicke der Wasserschicht proportional mit der relativen Luftfeuchtigkeit zu. Bei  $\phi = 90\%$  entsteht auf der PET-Oberfläche eine Wasserschicht mit einer Dicke von ca. 1,4 nm und an der PA-Oberfläche von etwa 5 nm. Die Größe eines Wassermoleküls beträgt ca. 0,1 nm [120]. So kann man von der Ausbildung einer polymolekularen Wasserschicht an der Oberfläche der Kunststoffe ausgehen.

### 4.3 Oberflächenwiderstand

Der elektrische Widerstand der Kunststoffoberfläche ist ein Maß für die Beweglichkeit der Ladungsträger, der mit dem Ladungstransfer und -rückfluss zwischen den kontaktierenden Teilchen in engem Zusammenhang stehen dürfte (s. **2.5.1**). Seine Charakterisierung erfolgt mittels Messung des spezifischen Oberflächenwiderstandes der Kunststoffoberfläche.

Der spezifische Oberflächenwiderstand ist definiert als das Verhältnis zwischen der Gleichspannung  $U$ , die zwischen zwei auf dem Probekörper aufgesetzten Elektroden angelegt wird, und der Stromstärke  $I$  zwischen den Elektroden nach einer vorgegebenen Zeit. Er berechnet sich aus

$$\rho_s = K(U / I) , \quad (11)$$

wo  $K$  den aus der Elektrodenanordnung berechneten Geometriefaktor darstellt.

Der Oberflächenwiderstand ist physikalisch nicht exakt definierbar. Denn auch ein Teil der oberflächennahen Schicht der Probe wird mit der Messung erfasst. So besitzt er mehr den Charakter einer Vergleichsgröße [132], wobei die verwendete Elektrodenanordnung und die Messbedingungen anzugeben sind [130].

Die Messanordnung ergibt sich für hohe Widerstände entsprechend DIN IEC 93 [127] (entspricht ASTM D257) aus **Bild 28**.

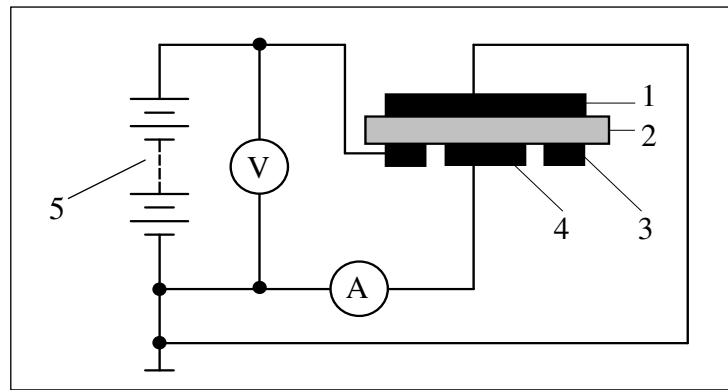


Bild 28: Messanordnung für hohe Oberflächenwiderstände

(1) Schutzelektrode; (2) Probekörper; (3) äußere Ringelektrode; (4) innere Elektrode;  
(5) Spannungsquelle

Die Bestimmung des spezifischen Oberflächenwiderstandes erfolgte im Labor des Instituts für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik der TU Bergakademie Freiberg sowie im akkreditierten Labor des Kunststoff-Zentrums in Leipzig. Die Messungen wurden an Spritzgussplatten, die aus den Kunststoffgranulaten (PA, PVC, PE, PP, PS, POM, PET) hergestellt wurden, durchgeführt. Die Abmessung der Platten betrug  $(100 \times 100 \times 1) \text{ mm}^3$ .

Das für die Messungen am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik verwendete hochpräzise Messsystem der Fa. Keithley Instruments Inc. (Cleveland, Ohio, USA) besteht aus einem Elektrometer Typ 6517A mit integrierter Spannungsquelle sowie aus einer Messzelle Typ 8009. In der Messzelle befinden sich die Elektroden, die gegen äußere, die Messung störende Einflüsse abgeschirmt sind. Ihre Anordnung ist im **Bild 29** dargestellt. Ein Federmechanismus erzeugt einen konstanten Kontaktierungsdruck zwischen Elektroden und Probekörper. Um definierte Temperaturen und relative Luftfeuchtigkeiten einzustellen, wurden die Messzelle und die Proben in einem Klimaprüfschrank der Fa. WEISS Umwelttechnik Typ SB 22/160/40 konditioniert. Ein Betauungsschutz im Klimaprüfschrank sorgte dafür, dass im Prüfraum auch bei höherer relativer Luftfeuchtigkeit kein Wasserdampf kondensierte.

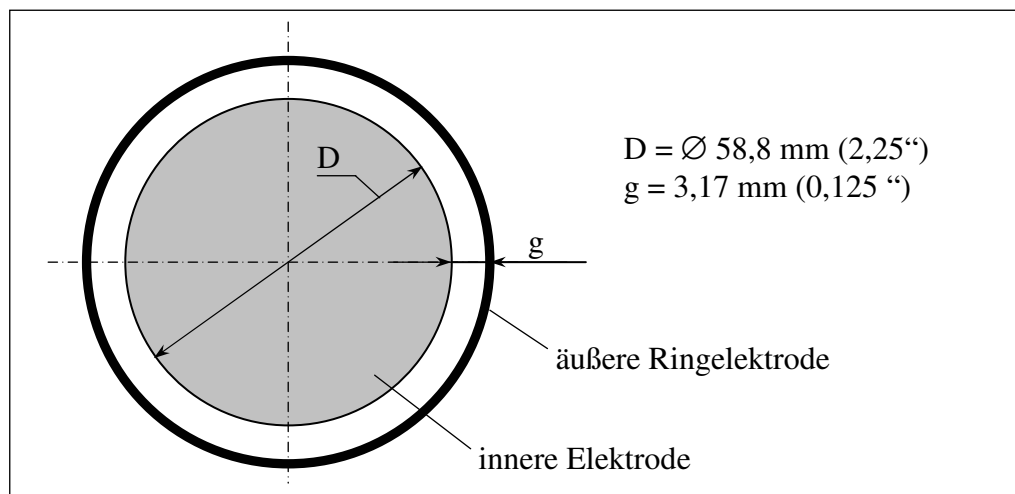


Bild 29: Elektrodenanordnung in der Messzelle Typ 8009 der Fa. Keithley

Der mit der Messanordnung entsprechend **Bild 28** ermittelte Stromfluss setzt sich aus folgenden drei Teilströmen zusammen (**Bild 30**):

- Strom  $I_C$  für die kapazitive Aufladung der Elektrodenanordnung,
- Strom  $I_R$ , der an der Kunststoffoberfläche fließt und für den Oberflächenwiderstand der Probekörper relevant ist,
- Hintergrundstrom  $I_H$ , der verschiedene Ursachen haben kann. Beispielsweise könnte er aus Ladungen resultieren, die schon vor der Messung auf dem Probekörper vorhanden waren. Der Hintergrundstrom ist dadurch gekennzeichnet, dass seine Richtung unabhängig von der angelegten Spannungspolarität ist. Er kann ohne angelegte Spannung gemessen werden.

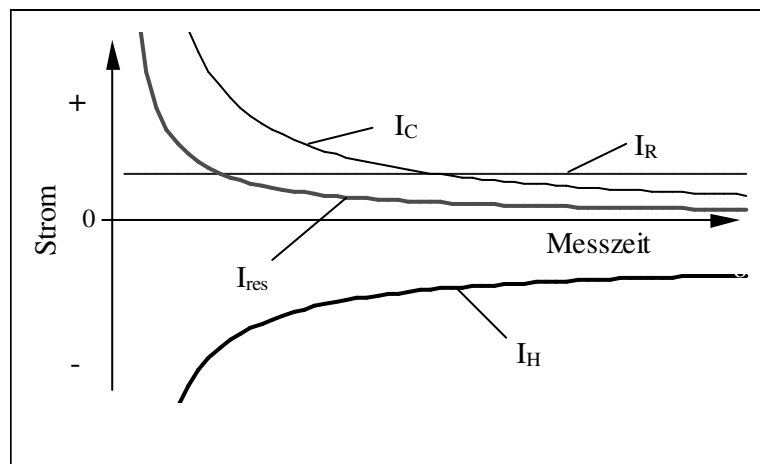


Bild 30: Entstehende Teilströme und resultierender Stromfluss in Abhängigkeit von der Messzeit, schematisch

$I_{res}$  resultierender Strom;  $I_C$  Strom für die kapazitive Aufladung der Elektrodenanordnung;  
 $I_R$  Strom, der an der Kunststoffoberfläche fließt;  $I_H$  Hintergrundstrom

Mit der „traditionellen“ Messmethodik werden alle Teilströme gemeinsam erfasst und gehen in die Berechnung ein. Entstehen sehr hohe Hintergrundströme, können die Messergebnisse stark verfälscht werden bzw. es ergeben sich sogenannte negative Widerstände [129, 133]. Die von der Fa. Keithley entwickelte neue Messmethodik, das Umpolverfahren, ermöglicht ein mathematisches Eliminieren dieser störenden Hintergrundströme. Das wird dadurch erreicht, dass man die angelegte Spannung hinsichtlich ihrer Polarität in bestimmten vorgegebenen festen Zeitabständen mehrfach wechselt (**Bild 31**). Dabei wird ausgenutzt, dass der Hintergrundstrom sowohl bei positiver als auch bei negativer angelegter Spannung seine Richtung nicht ändert. Vor jedem Polaritätswechsel wird eine Strommessung durchgeführt. Für die Berechnung des Oberflächenwiderstandes werden vier nacheinander gemessene Stromwerte herangezogen, mit denen ein binomial gewichteter Mittelwert gebildet wird:

$$I = (I_1 + 3(-I_2) + 3 I_3 + (-I_4))/8 \quad (12)$$

Die Erfassung der Messwerte und die Berechnung des spezifischen Oberflächenwiderstandes erfolgte mit dem High Resistance Software Modell 6524 der o. g. Firma.

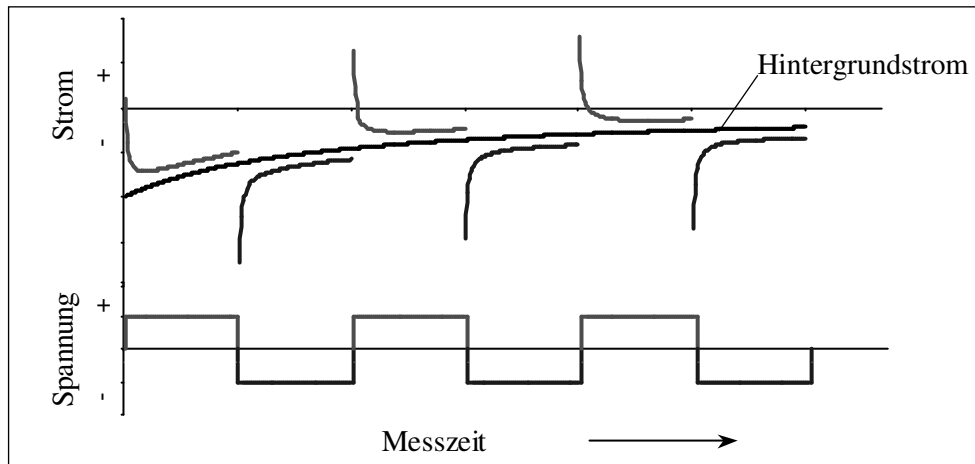


Bild 31: Oberflächenwiderstandsmessung mittels Umpolverfahren [133]

Die in Vorversuchen ermittelten Versuchsbedingungen für die eigenen Messungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- an der Elektrode angelegte Spannung:  $\pm 100 \text{ V}$
- Zeitabstand zwischen zwei Polaritätswechseln: 15 s
- Konditionierung der Proben: mindestens 16 h
- Temperatur:  $25^\circ \text{C}$
- relative Luftfeuchtigkeit: 10, 30, 50, 70 %

Die Messgrenze des Gerätes wird durch die Größe des Stromes bestimmt, der ohne Probekörper nur bei Anwesenheit von Luft zwischen den Elektroden erfasst wird [133]. Ein Abstandhalter aus PE sorgt dafür, dass die Elektroden ausreichend voneinander getrennt sind. Als Messgrenze wurde ein spezifischer Oberflächenwiderstand von  $5 \cdot 10^{17} \Omega$  ermittelt.

Für die Messungen am Kunststoff-Zentrum in Leipzig wurde ein Megohmmeter Typ M 1500 P der Fa. Sefelec und eine Schutzring-Elektrode Typ SRE 20 verwendet. Die Elektrodenanordnung zeigt **Bild 32**.

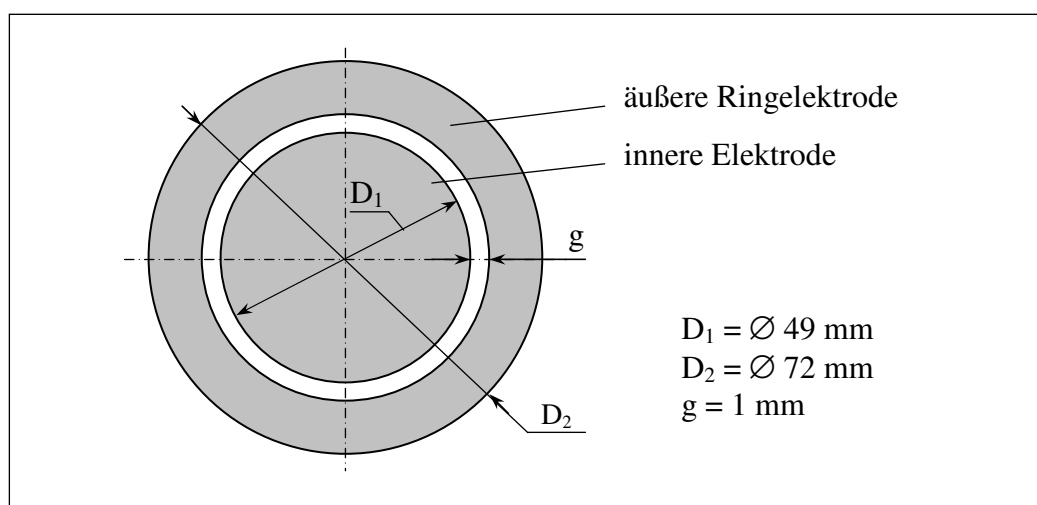


Bild 32: Geometrie der Schutzringelektrode Typ SRE 20 der Fa. Sefelec

Die Messung erfolgte unter klimatisierten Laborbedingungen bei  $t = 23\text{ °C}$  und  $\phi = 50\%$ . Die an die Elektrode angelegte Spannung betrug 100 V, die Messzeit 60 s. Die ermittelte Messgrenze lag bei ca.  $3 \cdot 10^{16}\ \Omega$ .

In **Tabelle 7** werden die mit beiden Messsystemen ermittelten spezifischen Oberflächenwiderstände der Kunststoffe angegeben und mit denen der Literatur verglichen.

Tabelle 7: Spezifische Oberflächenwiderstände der Kunststoffe, gemessen mit dem Messsystem der Fa. Keithley (bei  $t = 25\text{ °C}$  und  $\phi = 50\%$ ) und der Fa. Sefelec ( $t = 23\text{ °C}$ ,  $\phi = 50\%$ ) sowie Literaturwerte

Kunststoff	spezifischer Oberflächenwiderstand in $\Omega$			
	Messsystem Fa. Keithley	Messsystem Fa. Sefelec	Literaturwerte	
			[141]	[142]
PA	$5,0 \cdot 10^{16}$	$10^{13} \dots 10^{16}$	ca. $10^{12}$	$10^{11} \dots 10^{15}$
PET	$1,5 \cdot 10^{17}$	$> 3 \cdot 10^{16}$	$> 10^{13}$	$10^{14} \dots 10^{15}$
POM	$2,3 \cdot 10^{17}$	ca. $10^{16}$	ca. $10^{15}$	$10^{13} \dots 10^{16}$
PVC	$2,4 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{14} \dots 7 \cdot 10^{15}$	ca. $10^{13}$	$10^{13} \dots 10^{14}$
PS	$3,8 \cdot 10^{17}$	$> 3 \cdot 10^{16}$	ca. $10^{15}$	$10^{14} \dots 10^{15}$
PE	$4,0 \cdot 10^{17}$	$> 3 \cdot 10^{16}$	$10^{13} \dots 5 \cdot 10^{13}$	$10^{13} \dots 10^{14}$
PP	$4,2 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^{16} \dots > 3 \cdot 10^{16}$	ca. $10^{13}$	$10^{13} \dots 10^{14}$

Die mit dem Messsystem der Fa. Keithley gemessenen spezifischen Oberflächenwiderstände der Kunststoffe liegen in einem relativ engen Bereich deutlich über den in der Literatur angegebenen Werten. Das betrifft vor allem PA. Bei den Messungen des Oberflächenwiderstandes von PA traten die stärksten Hintergrundströme auf. In **Bild 33** ist beispielhaft für verschiedene Kunststoffe der typische Verlauf der Hintergrundströme in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Sie lagen bei PA, PVC, POM und PET im Bereich von  $10^{-13}$  bis  $10^{-12}$  A. Die für die spezifischen Oberflächenwiderstände verantwortlichen Ströme betrugen nur ca.  $10^{-14}$  A.

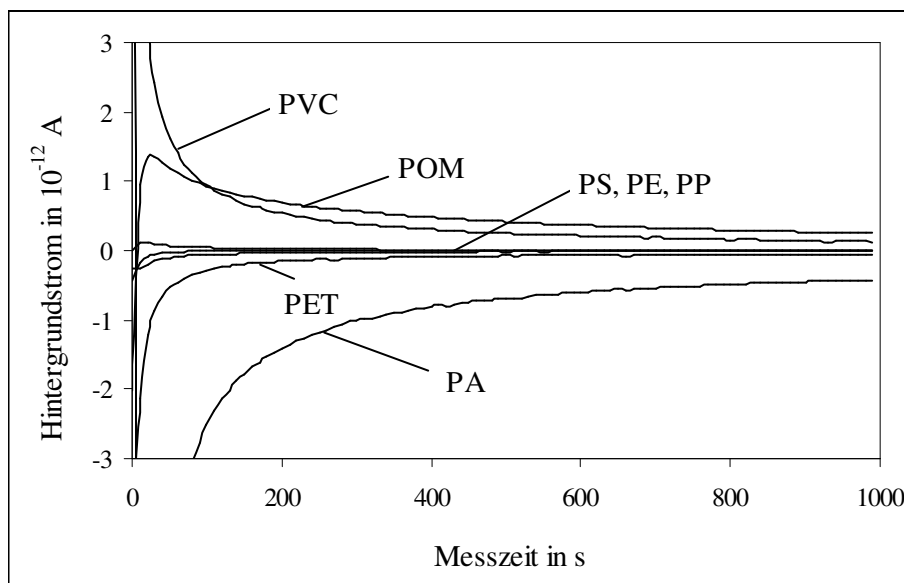


Bild 33: Typische Hintergrundströme in Abhängigkeit von der Messzeit

Bei einer bewussten Kontaktierung der Probekörper-Oberflächen von PE, PP und PS mit anderen Kunststoffen wurden auch bei diesen Kunststoffen stärkere Hintergrundströme gemessen.

Die Polarität der Hintergrundströme war nicht einheitlich. So konnte man z. B. bei PA zwar überwiegend negative Hintergrundströme beobachten (bei ca. 90 % der Messungen). Es wurden aber auch positive oder gar keine Hintergrundströme festgestellt. Davon ausgehend kann man annehmen, dass sich die Art der Probekörperherstellung, ihre Lagerung und Behandlung entscheidend auf die Polarität und Höhe der auf der Probekörper-Oberfläche vorhandenen Ladungen und so auf die Entstehung der Hintergrundströme auswirken kann. Eine Probenpräparation, wie z. B. die Herstellung von Spritzgussplatten kann ebenfalls zu einer triboelektrischen Aufladung eines Probekörpers führen [68, 140].

Auch die Ergebnisse der Messungen am Kunststoff-Zentrum Leipzig, die mit der „traditionellen“ Methode durchgeführt wurden, ergaben hochohmige Oberflächenwiderstände und höhere Werte als in der Literatur angegeben sind. Der Unterschied ist einerseits in der hohen Reinheit der Kunststoffe (geringe Mengen oder gar keine Additive, keine Kontamination) zu vermuten [128]. Andererseits kann die Kontaktierungsart zwischen dem Probekörper und den Elektroden den Wert des spezifischen Oberflächenwiderstandes beeinflussen [129, 130].

Die Messgrenze des Messsystems der Fa. Sefelec lag bei ca.  $3 \cdot 10^{16} \Omega$ . Daher konnten die mit dem Keithley-Messsystem erhaltenen hohen Werte nicht erreicht werden. Bei den Kunststoffen, wo starke Hintergrundströme nachgewiesen wurden, waren die Messwerte des Sefelec-Messsystems mit starken Streuungen verbunden.

Aus der Literatur ist bekannt, dass die relative Luftfeuchtigkeit den Oberflächenwiderstand stark beeinflusst (s. 2.5.2). Um das zu überprüfen, wurden die Probekörper bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchtigkeiten konditioniert und nachfolgend ihre Oberflächenwiderstände gemessen. In **Bild 34** sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Bei den unpolaren bzw. nur wenig polaren Kunststoffen PE, PP und PS ändert sich der spezifische Oberflächenwiderstand bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $\varphi = 50 \%$  nur geringfügig. Bei einem Wert von  $\varphi = 70 \%$  tritt eine sprunghafte Erhöhung auf. Diese überraschende Änderung könnte mit der bei PS gemessenen sprunghaften Zunahme der Schichtdicke des Wassers an der Oberfläche im Zusammenhang stehen (s. **Bild 27b**). Das würde allerdings bedeuten, dass das an der unpolaren Kunststoffoberfläche angelagerte Wasser nicht zur Erhöhung ihrer Oberflächenleitfähigkeit beiträgt. Es würde sogar die ursprünglich vorhandene sehr geringe Leitfähigkeit weiter herabsetzen.

Dabei ist aber zu beachten, dass die Messwerte die Messgrenze des Messgerätes überschreiten. Somit ist vorstellbar, dass in diesem extremen Messbereich durch die hohe relative Luftfeuchtigkeit sogenannte Driftströme zwischen den Elektroden entstanden, die mit dem Elektrometer nicht erfasst wurden, aber den gemessenen Strom verminderten und dadurch den ermittelten Oberflächenwiderstand erhöhten. Für eine signifikante Änderung der elektrischen Eigenschaften von PS, PP und PE bei hohen relativen Luftfeuchtigkeiten spricht aber die von *Mientkewitz* [14] dokumentierte Zunahme der Aufladung in den Gemischen PS/PE, PS/PP und PP/PE im Feuchtebereich von  $\varphi \geq 50 \%$ .

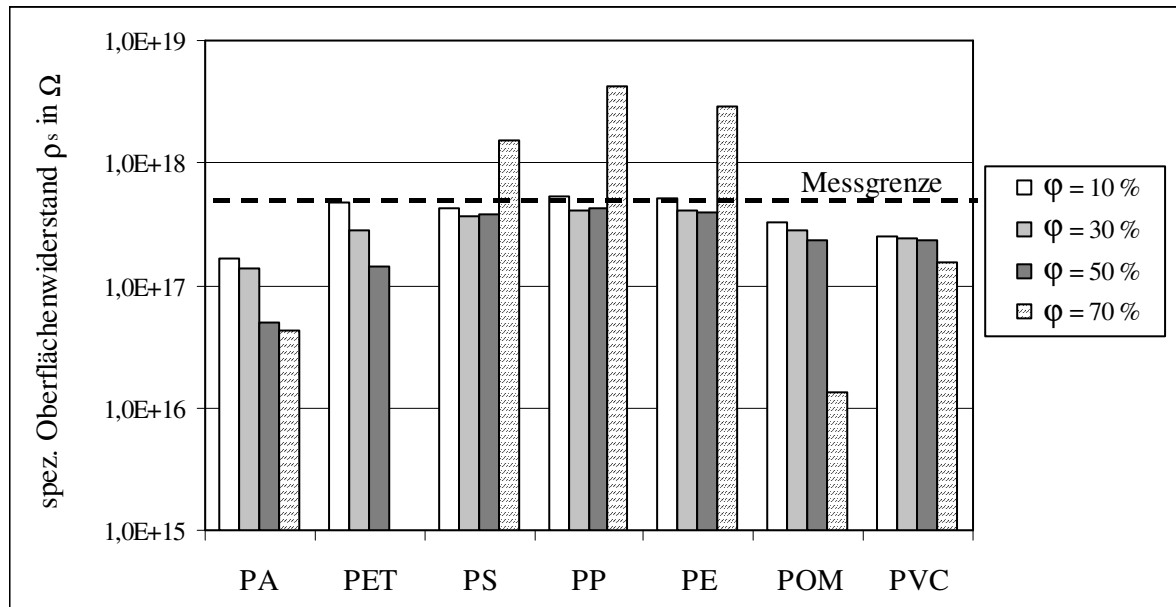


Bild 34: Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf den spezifischen Oberflächenwiderstand der Kunststoffe

Bei den polaren Kunststoffen PA, POM, PVC und PET nimmt der spezifische Oberflächenwiderstand mit zunehmender Luftfeuchtigkeit entsprechend der in der Literatur beschriebenen allgemeinen Tendenz ab.

Im Gegensatz zu den anderen Kunststoffen, deren Oberflächenwiderstandsmessungen gut reproduzierbar waren, streuten die Messwerte von PET bei höherer relativer Luftfeuchtigkeit relativ stark.

#### 4.4 Verhalten von elektrischen Ladungen auf Kunststoffoberflächen

Zur Beobachtung des Verhaltens von elektrischen Ladungen auf den Oberflächen der Kunststoffe fand eine spezielle Rasterkraftmikroskopie, die EFM (Electric Force Microscopy) Anwendung \*).

Ein Rasterkraftmikroskop erfasst die Wechselwirkungen zwischen einer feinen Spitze, die sich auf einem Cantilever befindet, und dem Probekörper. Dabei bewegt sich die Spitze über der Oberfläche der Probe, wobei ihre horizontale und vertikale Position ermittelt wird [124]. Die Messanordnung für die EFM ist in **Bild 35** schematisch dargestellt.

\*) Die EFM-Untersuchungen wurden von Dipl.-Phys. A. Janke (Institut für Polymerforschung Dresden) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 285, Teilprojekt B9, der DFG durchgeführt.



Für die Abbildung der Oberflächenladungen wurden zwei Modi des EFM angewendet. Die Erfassung der Stabilität von aufgetragenen Ladungen erfolgte im Modus Electric Field Gradient Imaging (EFGI).

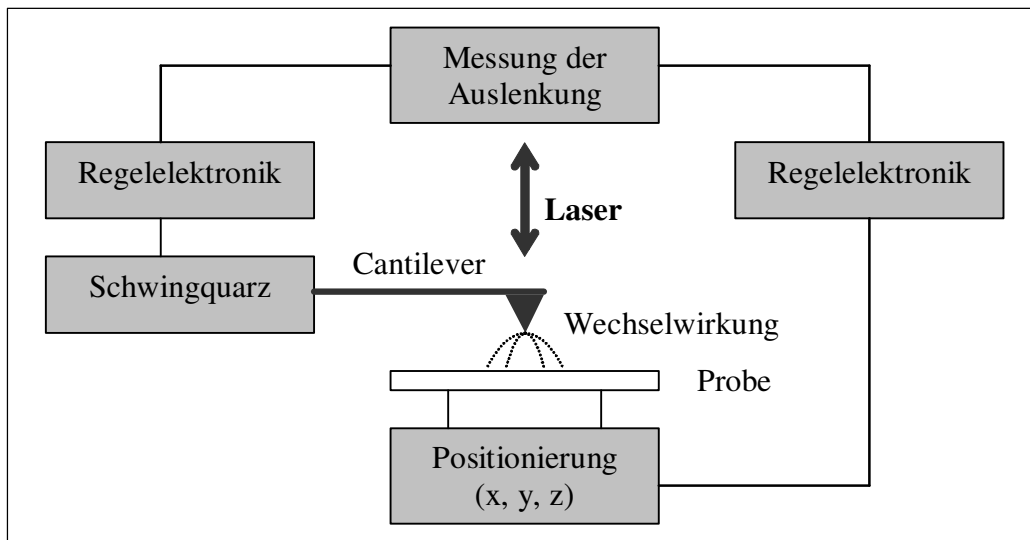


Bild 35: Messanordnung für Electric Force Microscopy, schematisch [124]

Die Experimente im Modus EFGI bestanden aus folgenden Schritten (**Bild 36a**):

- 1. Scan: Aufnahme der Topographie der Probekörperoberfläche im Contact-Modus. Dabei wurde die Cantileverspitze im Direktkontakt über die Oberfläche gerastert und dabei ihre Auslenkung gemessen. Daraus wurde die Topographie berechnet.
- Aufbringen einer Ladung durch direkten Kontakt zwischen Probekörper und Cantileverspitze, an der eine definierte negative oder positive Spannung angelegt war.
- 2. Scan: Detektion der aufgetragenen Ladung im Lift Modus nach festgelegter Zeit, wobei zwischen Cantileverspitze und Probekörperoberfläche ein vorgegebener Abstand gehalten wurde. Im Lift Modus wurden die Kraftgradienten zwischen Spitze und Oberfläche erfasst. Dazu wurde der Cantilever mittels Piezoelement in Schwingungen versetzt. Das elektrostatische Kraftfeld der aufgetragenen Ladung veränderte die effektive Federkonstante des Cantilevers und damit seine Resonanzfrequenz. Aus der Änderung der Resonanzfrequenz wurde dann das „Höhenbild“ der Ladung berechnet.

Im Modus Surface Potential Imaging (**Bild 36b**) wird der Ladungszustand einer Oberfläche abgebildet. Zunächst wurde wie im Modus EFGI die Topographie bestimmt. Im zweiten Schritt wurde an dem Cantilever eine Spannung angelegt und die Oberfläche gerastert. Durch die vorhandenen Ladungen wird der Cantilever angezogen bzw. abgestoßen, was durch Änderung der angelegten Spannung kompensiert wurde. Aus der gemessenen Spannung wurde dann das Potential der Oberfläche berechnet.

Die EFM-Messungen erfolgten an mittels Spin-Coating hergestellten Filmen den in **Tabelle 4** angegebenen Kunststoffe. Für die Untersuchungen wurde ein Rasterkraftmikroskop Typ NanoScope IIIa-Multimode der Fa. Digital Instruments (Santa Barbara,

California, USA) verwendet. Die Messungen erfolgten unter atmosphärischen Laborbedingungen bei ca. 20 °C und bei 35 bis 55 % relativer Luftfeuchtigkeit.

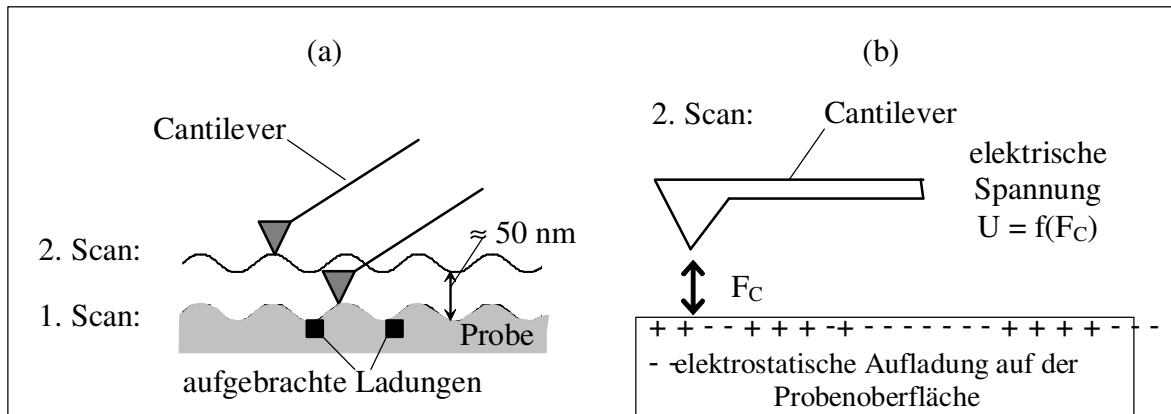


Bild 36: Electric Force Microscopy (EFM) in Modi Electric Field Gradient Imaging (EFGI) (a) und Surface Potential Imaging (SPI) (b); schematisch

Die Detektion der aufgetragenen Ladungen im Modus Electric Field Gradient Imaging lieferte für die verschiedenen Kunststoffoberflächen ein unterschiedliches Bild. Bei PA flossen die Ladungen sofort breit und schnell ab (**Bild 37**). Auch von der PVC-Oberfläche waren die Ladungen innerhalb 1,5 h nahezu vollständig abgefließen (**Bild 38**).

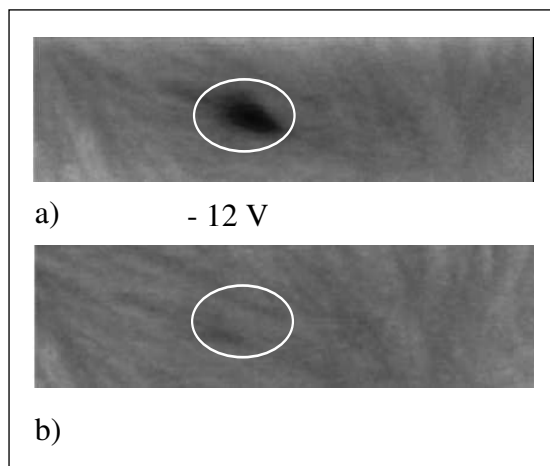


Bild 37: PA direkt nach der Ladungsaufbringung (a) und 10 min später (b)

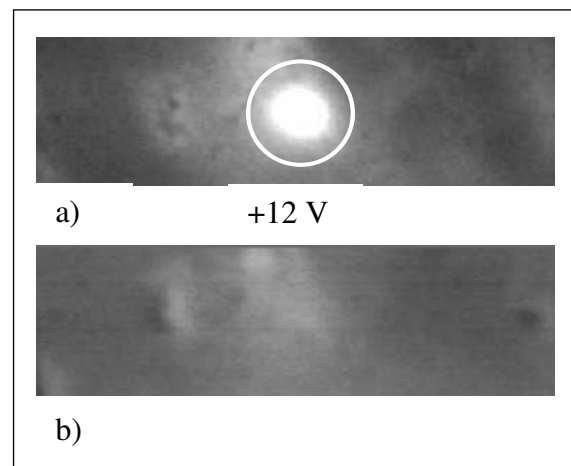


Bild 38: PVC direkt nach der Ladungsaufbringung (a) und nach 1,5 h (b)

Die Ladungen, die auf PET und POM aufgebracht wurden, ließen sich auch unmittelbar nach dem Aufbringen nicht detektieren. Offensichtlich kam es bei diesen Kunststoffen zu einem sehr schnellen Ladungsabfluss. Auf PE und PMP blieben dagegen die aufgetragenen Ladungen über mehrere Stunden stabil bestehen (**Bild 39** und **40**).

Der schnelle Ladungsabfluss von den polaren Oberflächen des PA, PVC, POM und PET deutet auf eine relativ hohe elektrische Leitfähigkeit dieser Stoffe hin, was durch die Messung ihrer spezifischen Oberflächenwiderstände bestätigt wurde (siehe **4.3**).

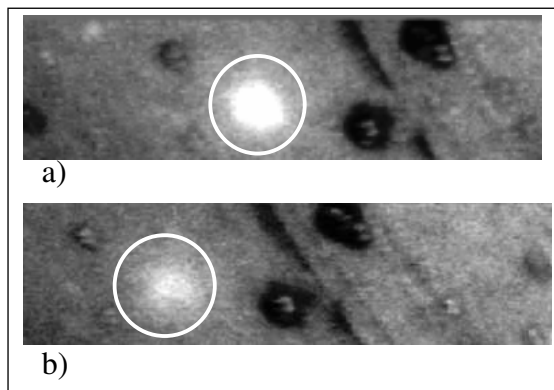


Bild 39: PE direkt nach der  
Ladungsaufbringung (a)  
und nach 2,5 h (b)

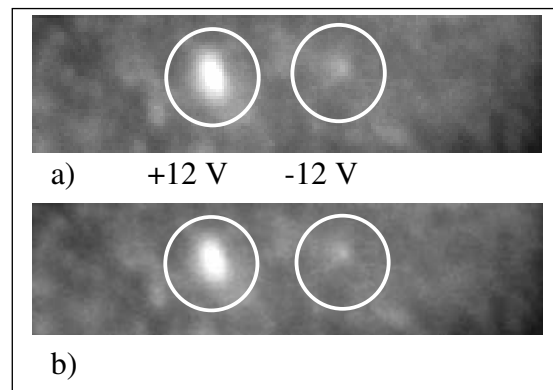


Bild 40: PMP direkt nach der  
Ladungsaufbringung (a)  
und nach 3 h (b)

Auf der Oberfläche des PMP wurden die aufgetragenen positiven und negativen Ladungen als helle Flecke beobachtet, wobei die positiven Ladungen wesentlich heller erschienen (**Bild 40**). Daraus lässt sich ableiten, dass das PMP sog. native positive Oberflächenladungen besitzt, wodurch die zusätzlich aufgetragene negative Ladung insgesamt noch „positiv“ abgebildet wird.

Auf dem PS konnte man im Modus EFGI deutliche, zeitlich stabile helle und dunkle Flecken (Domänen) auf der gesamten Oberfläche beobachten (**Bild 41a**). Zusätzlich aufgetragene Ladungen erschienen mit ähnlicher Helligkeit wie die ursprünglich hellen Flecken (**Bild 41b**).

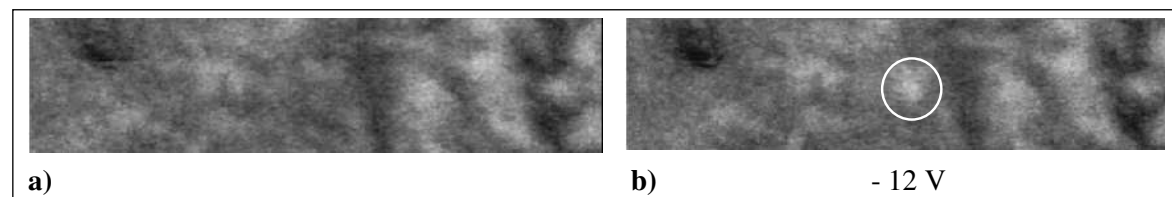


Bild 41: PS im Zustand vor dem Aufbringen von Ladungen (a) und direkt danach (b)

Im Modus Surface Potential Imaging war es möglich, die auf der PS-Oberfläche vorhandenen nativen Ladungen mit unterschiedlichen Vorzeichen abzubilden. Das erhaltene Bild zeigt zeitlich stabile, positiv und negativ aufgeladene Domänen, die unabhängig von der Topographie verteilt sind (**Bild 42**).

Eine Aufladung der Oberfläche während der Präparation der Probe konnte man nicht völlig ausschließen, was jedoch für die Ausbildung von Ladungsdomänen keine Erklärung wäre.

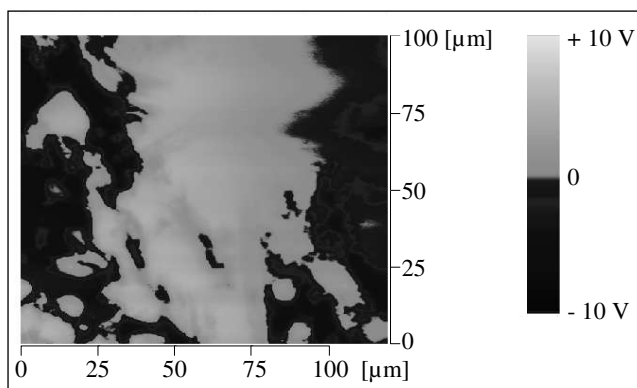


Bild 42: Surface Potential des PS

Von dem Phänomen negativer und positiver, direkt nebeneinander liegender Ladungsbereiche auf Kunststoffoberflächen wurde in [140] berichtet. Man vermutete, dass sie als Folge mehrerer Aufladungsmechanismen entstehen.

## 4.5 Lewis-Säure-Base-Eigenschaften

Als geeignete Methode für die Charakterisierung der Säure-Base-Eigenschaften einer Kunststoffoberfläche erwies sich die Bestimmung ihrer Polaritätsparameter  $\alpha$  und  $\beta$  mittels Adsorption solvatochromer Farbstoffe (ASF) <sup>\*)</sup> [90, 137, 138].

Bei der ASF-Methode lässt man geeignete Farbstoffe (Sondenmoleküle) aus ihrer Lösung an der zu charakterisierenden Kunststoffoberfläche adsorbieren. Dabei verwendet man Lösungsmittel mit niedriger Eigenpolarität. An der Oberfläche kommt es durch die Sondenmoleküladsorption zu einer Verschiebung des Maximums des Adsorptionsspektrums, das mittels UV/Vis-Spektroskopie gemessen wird. Aus den Adsorptionsmaxima  $\nu_{\max}$  werden mit empirischen Korrelationsgleichungen die Lewis-Säure- und Lewis-Base-Eigenschaften berechnet. Der Lewis-Säure-Parameter  $\alpha$  charakterisiert die Elektronenpaar-Akzeptor-Eigenschaft, der Lewis-Base-Parameter  $\beta$  die Elektronenpaar-Donator-Eigenschaft der Kunststoffoberfläche.

Es wurden drei verschiedene Farbstoffe, Dicyano-bis(1, 10-phenantrolin)eisen(II) (FE), Aminobenzodifuranon (ABF) und Michler's Keton (MK), verwendet. Die Adsorption der Farbstoffe erfolgte aus dem schwach polaren Lösungsmittel 1,2-Dichlorethan (DCE).

Die empirischen Gleichungen für die Farbstoffe FE, ABF und MK lauten [90]:

$$\alpha = -10,26 + 0,086 \nu_{\max}(\text{MK})10^{-3}[\text{cm}^{-1}] + 0,486 \nu_{\max}(\text{FE})10^{-3}[\text{cm}^{-1}] \quad (13)$$

$$\beta = 3,15 + 0,144 \nu_{\max}(\text{FE})10^{-3}[\text{cm}^{-1}] - 0,304 \nu_{\max}(\text{ABF}) 10^{-3}[\text{cm}^{-1}] \quad (14)$$

Die Probenpräparation und die Durchführung der Messung gestaltete sich wie folgt: Die pulverförmige Kunststoffprobe (125-200  $\mu\text{m}$ ) trocknete man in einem Vakuumtrockenschrank 5 h lang bei  $t = 50^\circ\text{C}$  und  $p = 10^{-3}$  mbar. Die getrocknete Probe wurde in DCE suspendiert und anschließend der in DCE gelöste Farbstoff zugegeben. Nach 5 min Adsorptionszeit wurde das Lösungsmittel abgezogen und der restliche Farbstoff mit DCE ausgewaschen. Danach erfolgte das Präparieren des nassen Pulvers auf einem Objektträger. Nach einer Trocknung der Probe für ca. 1 h unter atmosphärischen Bedingungen bestimmte man die UV/Vis-Adsorptionsspektren mit einem Spektrometer Typ MC 40 der Fa. Carl Zeiss Jena. Aus dem ermittelten  $\nu_{\max}$  konnten die Polaritätsparameter  $\alpha$  und  $\beta$  gemäß der Gleichungen (13) und (14) berechnet werden.

Die ermittelten Werte sind in **Tabelle 8** zusammengefasst.

---

<sup>\*)</sup> Die ASF-Untersuchungen wurden von Dr. A. Augsburg (Institut für Polymerforschung Dresden) in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. S. Spange von der Technischen Universität Chemnitz, Lehrstuhl für Polymerchemie, durchgeführt.

Tabelle 8: Die Lewis-Säureparameter  $\alpha$  und Lewis-Baseparameter  $\beta$  aus ASF-Messungen an Kunststoffoberflächen

Kunststoff	$\alpha$	$\beta$
PA	0,86	1,13
PET	0,54	0,66
PS	0,29	0,35
PMMA	0,52	0,55
PE	< 0,18	< 0,25
PP	< 0,18	< 0,25
PB	< 0,18	< 0,25
PMP	< 0,18	< 0,25
POM	0,59	0,53
PVC	1,54	0,76
Farbstoff in DCE	0,18	0,25

An den Oberflächen der Polyolefine wurde keine Farbstoffadsorption nachgewiesen. Ihre Polaritätsparameter sind somit kleiner als die des verwendeten Lösungsmittels DCE. Die polaren Kunststoffe haben sowohl Elektronen-Donator- als auch Elektronen-Akzeptor-Eigenschaften. Bei PA, PET, PMMA und PS überwiegt dabei der Lewis-Base-Charakter, bei POM und PVC der Lewis-Säure-Charakter der Kunststoffoberfläche.

Die mittels Adsorption solvatochromer Farbstoffe bestimmten Polaritätsparameter sind integrale Größen. Jedoch lassen sich Zuordnungen zu den Oberflächengruppen der Kunststoffe treffen. Bei PA kann die Amidgruppe, die ein freies Elektronenpaar am Stickstoff besitzt, für die dominierenden Base-Eigenschaften verantwortlich gemacht werden. Demgegenüber bestimmt bei PVC das stark elektronegative Chlor den Lewis-Säure-Charakter der Oberfläche. Beim PS fungiert wahrscheinlich der Phenolring als schwache Lewis-Base [90].

## 5 Versuchsdurchführung, Methodik der Versuchsauswertung und Fehlerbetrachtung

### 5.1 Versuchsstand

Mit den Grundlagenuntersuchungen zur triboelektrischen Aufladung der Kunststoffe wurde das Ziel verfolgt, auch anwendungsorientierte Fragestellungen zu beantworten. Deshalb wurde in Anlehnung an bereits technisch realisierte Anlagen der in **Bild 43** fotografisch und in **Bild 44** schematisch dargestellte Versuchsstand aufgebaut. Die Ausgangsbasis bildete der von *Mientkewitz* [14] entwickelte Versuchsstand, der in vielen Teilen neu gestaltet, verändert und modifiziert wurde.

Der Versuchsstand besteht aus folgenden Hauptkomponenten:

- (a) Aufladungseinheit mit In-Stream-Ladungsmessung
- (b) elektrostatischer Freifallscheider mit Auffangbehältern (Faraday-Becher)
- (c) Luftkonditionieranlage

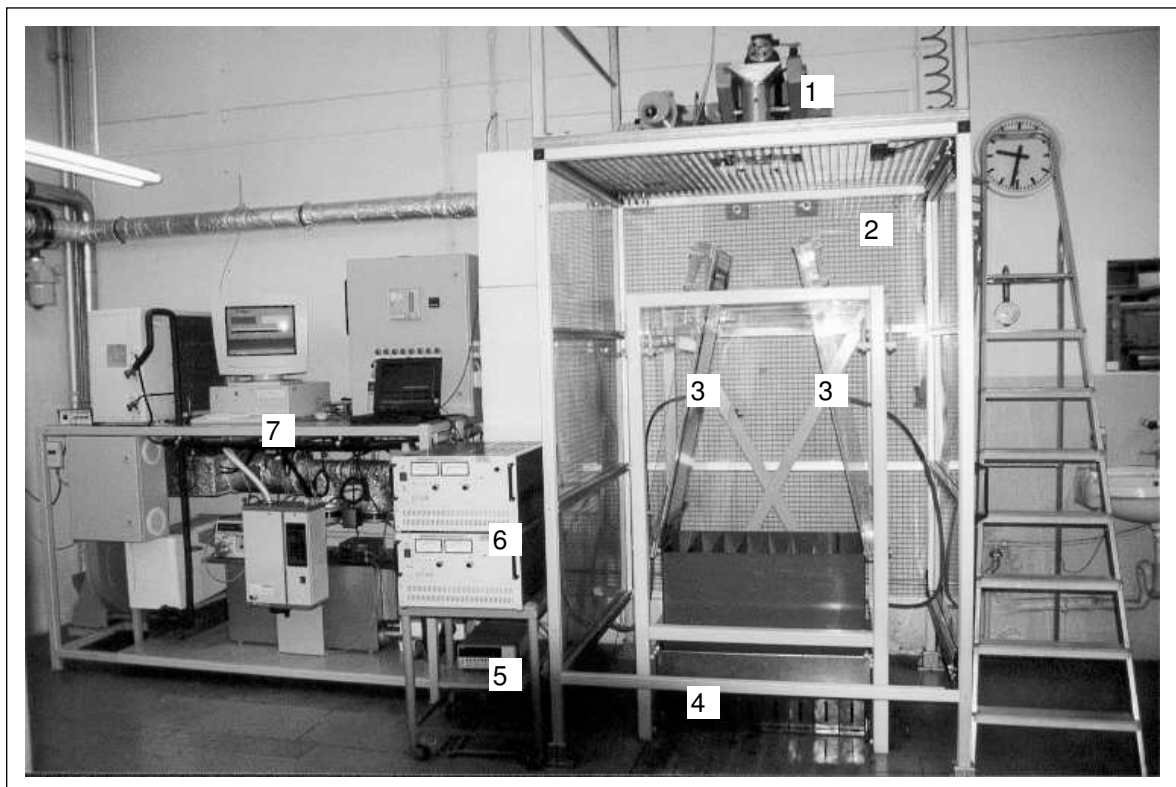


Bild 43: Fotografie des Versuchsstandes zur triboelektrischen Aufladung von Kunststoffen und ihrer Trennung im elektrostatischen Feld

(1) Aufladungseinheit; (2) elektrostatischer Freifallscheider; (3) Elektroden; (4) Auffangbehälter (Faraday-Becher); (5) Elektrometer; (6) Hochspannungsgleichrichter; (7) Luftkonditionieranlage

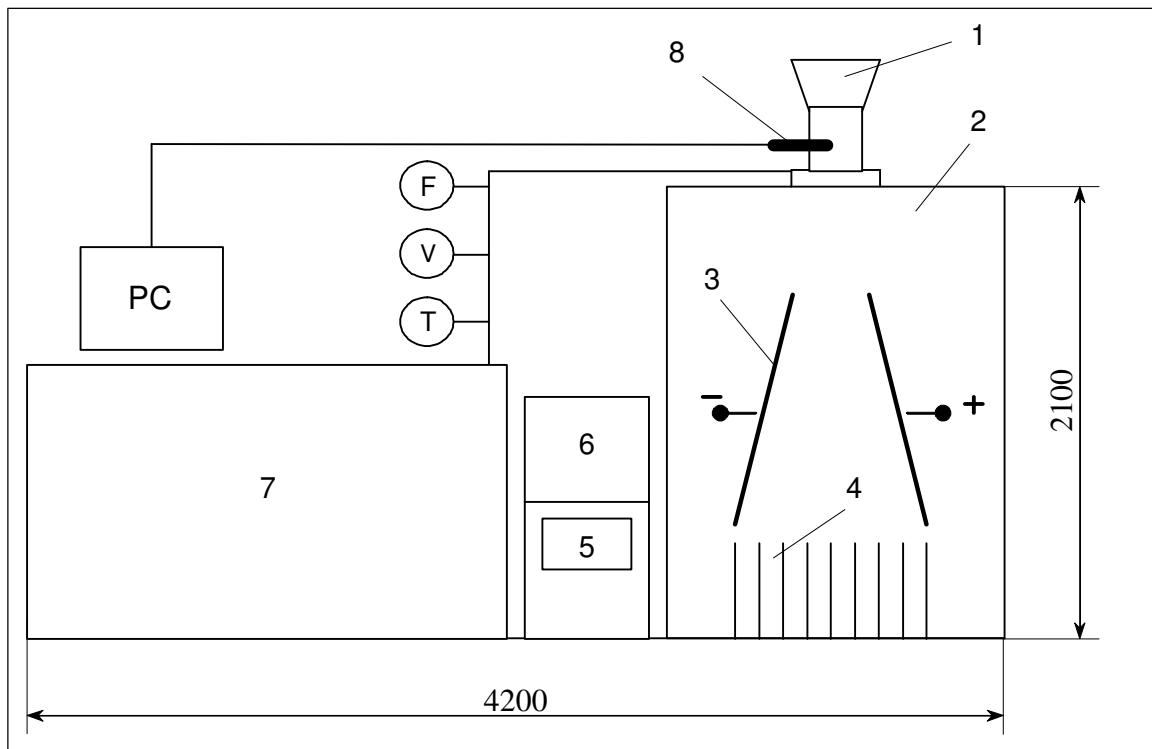


Bild 44: Versuchsstand zur triboelektrischen Aufladung von Kunststoffen und ihrer Trennung im elektrostatischen Feld, schematisch

(1) Aufladungseinheit; (2) elektrostatischer Freifallscheider; (3) Elektroden; (4) Auffangbehälter (Faraday-Becher); (5) Elektrometer; (6) Hochspannungsgleichrichter; (7) Luftkonditionieranlage; (8) In-Stream-Ladungsmessung

Messstellen: F relative Luftfeuchtigkeit; T Temperatur; V Luftgeschwindigkeit

#### (a) Aufladungseinheit mit In-Stream-Ladungsmessung

Die Aufladungseinheit ist als zylindrische Wirbelkammer ausgebildet, in der die Probe von der durchströmenden Luft aufgewirbelt wird. Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Wirbelzylinder ist von 0 bis 8 m/s variierbar. **Bild 45** zeigt eine fotografische Aufnahme der Aufladungseinheit.

Der obere Teil der Wirbelkammer ist trichterförmig ausgebildet, um eine Zirkulation der aufgewirbelten Kunststoffteilchen zu ermöglichen. Boden und Deckel des Apparates bilden Lochbleche, durch die von unten nach oben ein konditionierter Luftstrom geführt wird. Das Wandmaterial kann leicht gewechselt werden, indem wahlweise eine metallische oder kunststoffbeschichtete Wandung eingebaut wird. Die Al-, Cu- und Zn-Wandungen wurden aus den entsprechenden Metallblechen angefertigt. Für die Herstellung der Ag-, Au- und Ni-Wandungen wurde galvanisch eine Beschichtung des jeweiligen Metalls auf die Oberfläche eines Kupferzylinders aufgetragen. Bei der Kunststoff-Wandung handelt es sich um einen mit dem jeweiligen Kunststoffgranulat beklebten metallischen Grundkörper aus Zinkblech.

Im Boden des Aufladungsraums befindet sich ein schlitzförmiger Austrag, der nach definierter Aufladungszeit geöffnet wird und durch den die Kunststoffteilchen in den Freifallscheider gelangen.



Bild 45: Fotografie der Aufladungseinheit

Um während des Aufladungsvorganges den Ladungszustand einer Schüttung in der Wirbelschicht beurteilen zu können, musste ein Messgerät zur In-Stream-Ladungsmessung entwickelt werden. Dafür bot sich das in der Praxis bewährte Messprinzip zur Bestimmung von Staubkonzentrationen in strömenden Gasen bzw. zur Messung der elektrischen Ladung einzelner Partikeln an [141 bis 143]. Die am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik der TU Bergakademie Freiberg entwickelte Messvorrichtung ist schematisch in **Bild 46** angegeben.

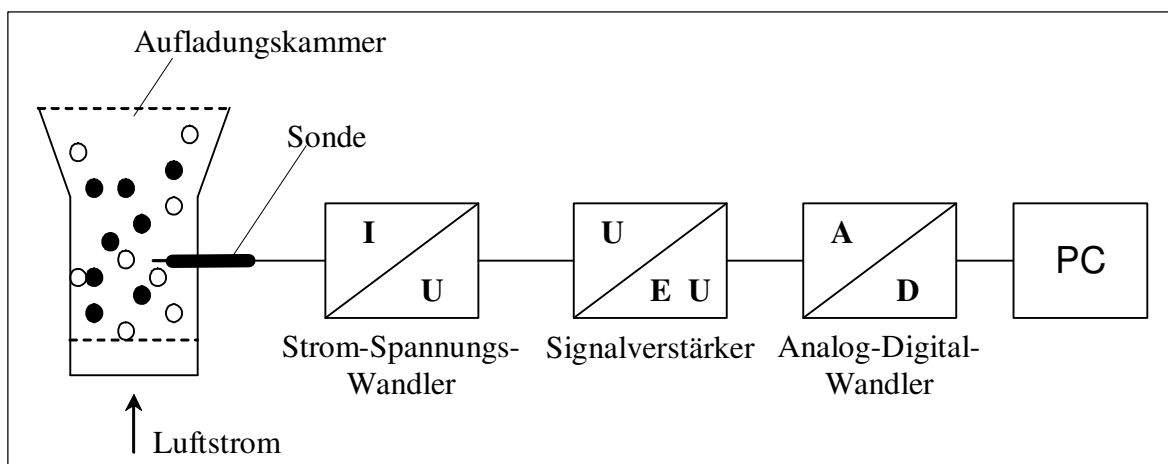


Bild 46: Vorrichtung zur In-Stream-Ladungsmessung, schematisch

Die Erfassung des Messsignals erfolgt mit einer nach dem Influenzprinzip arbeitenden Sonde, die sich direkt im Aufladungsraum befindet. Bis zur Metallspitze ist sie isoliert. Nähert sich ein elektrisch aufgeladenes Teilchen der Sondenspitze, findet in dieser eine Verschiebung der Ladungsträger (Elektronen) statt (**Bild 47**). Entfernt sich das Teilchen



wieder, fließen die Elektronen zurück, was als ein Signal mit entgegengesetzter Polarität erscheint.

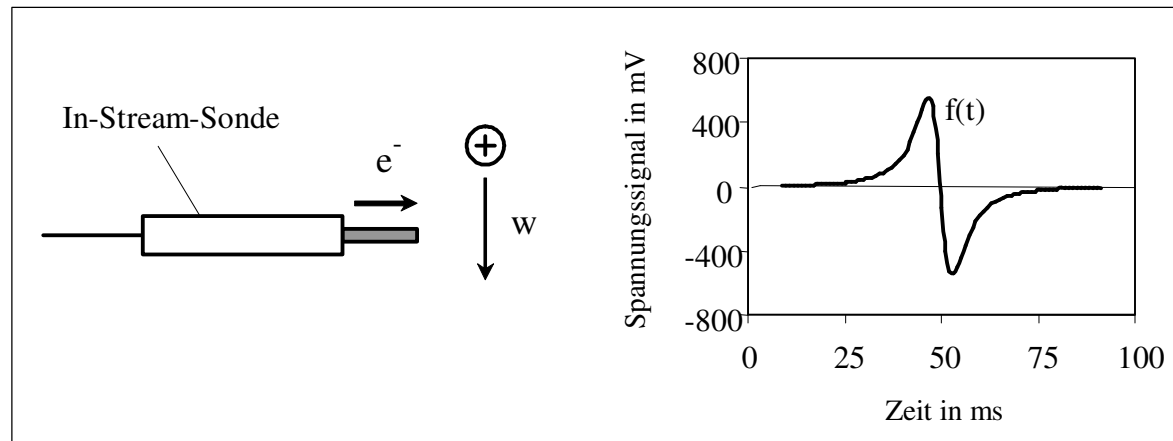


Bild 47: Prinzip der In-Stream-Ladungsmessung

Der entstehende Ladungsstrom wird mit einer Frequenz von 1000 Hz erfasst, im Messwandler als Spannungssignal abgebildet, verstärkt und mit einem Computer aufgenommen.

Die Signalbildung hängt von mehreren Faktoren, so z. B. von der Aufladung der Teilchen, vom Abstand zwischen Sondenspitze und Teilchen und von der Teilchengeschwindigkeit ab. In der Wirbelschicht wirken kontinuierlich mehrere Teilchen gleichzeitig auf die Sonde. Deshalb erfolgt die Auswertung des erfassten Signals durch statistische Kennwerte. Für definierte zeitliche Abstände wurde die Standardabweichung bzw. der Mittelwert des Signals berechnet. Unter den gleichen Messbedingungen erzeugten die elektrisch stärker aufgeladenen Teilchen signifikant ein stärkeres Spannungssignal.

#### (b) Elektrostatischer Freifallscheider mit integrierter Ladungsmessung

Der Freifallscheider (**Bild 48**) besteht aus zwei schräg angeordneten 1 m langen Elektroden aus Aluminium, die auf PVC-Platten aufgeklebt sind. Zwischen der positiven und der negativen Elektrode besteht ein Abstand von 310 mm an der oberen Kante und 710 mm an der unteren Kante. Die an den Elektroden angelegte Spannung wird von zwei Hochspannungsgleichrichtern der Fa. Heinzinger erzeugt. Die maximal einstellbare Spannung beträgt  $U = \pm 100$  kV.

Die aufgeladenen Kunststoffteilchen gelangen nach einer definierten Aufladungszeit in das elektrostatische Feld der Elektroden, wo sie entsprechend ihrer Ladungspolarität ausgelenkt werden. Unterhalb der Elektroden befinden sich die 8 Auffangbehälter, die als Faraday-Becher ausgebildet sind. Die Ladung der in ihnen aufgefangenen Kunststoffteilchen wird mittels Elektrometer Typ 6517A der Fa. Keithley Instruments (Cleveland, Ohio, USA) gemessen. Das Elektrometer ist mit einer Messumstellungskarte Typ 6522 der selben Firma ausgerüstet, mit der die Ladung in den einzelnen Faraday-Bechern mit einer Abtastzeit von 0,7 s zwischen zwei Kanälen erfasst wird. Die Ansteuerung der Ladungsmessung erfolgt rechnergestützt mit einer *TestPoint* Software.

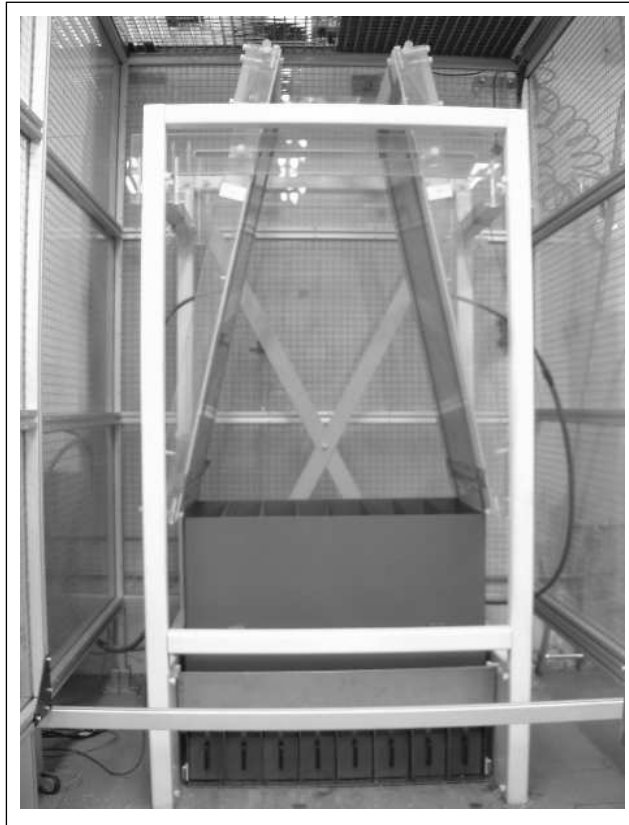


Bild 48: Fotografie des elektrostatischen Freifallscheiders

### (c) Luftkonditionieranlage

Die Luftkonditionieranlage ist in **Bild 49** schematisch dargestellt.

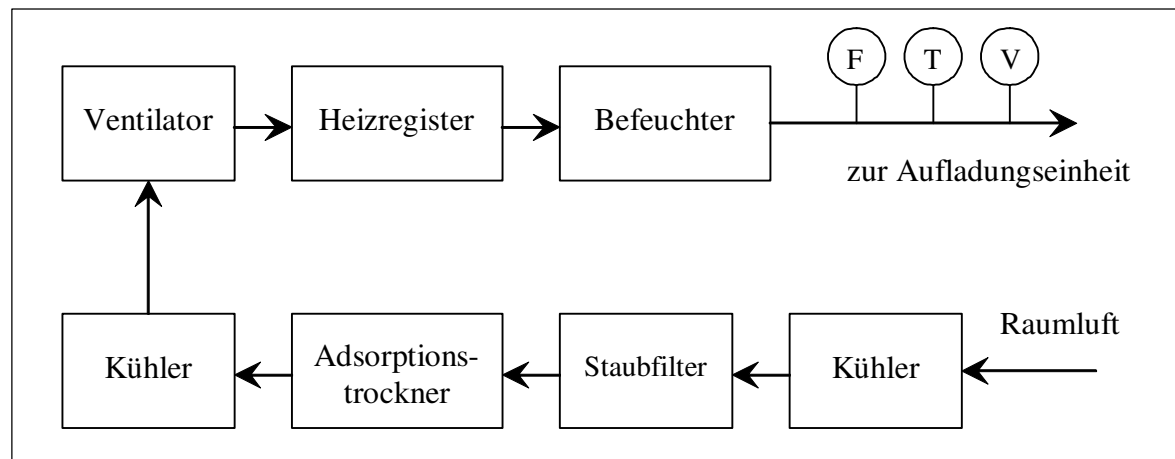


Bild 49: Luftkonditionieranlage, schematisch

Messstellen: F relative Luftfeuchtigkeit; T Temperatur; V Luftgeschwindigkeit

Die Anlage saugt Raumluft an, die zunächst im Kühler auf eine Temperatur von ca. 5 °C gekühlt wird. Diese Temperatur ist erforderlich, damit im nachfolgenden Adsorptions-trockner die Luftfeuchtigkeit auf einen niedrigen Ausgangswert herabgesetzt werden kann. Die kalte und trockene Luft wird anschließend mit Hilfe einer Elektroheizung auf die gewünschte Temperatur erwärmt. Danach erfolgt die Einstellung der relativen Luftfeuch-

tigkeit mittels Dampfbefeuchter. Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und die Strömungsgeschwindigkeit der in die Aufladungseinheit strömenden Luft werden kontinuierlich gemessen.

Die einstellbare Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit hängen vom Volumenstrom der zu konditionierenden Luft ab. Bei 140 m<sup>3</sup>/h Luftmenge kann die Temperatur im Bereich von 20 bis 35 °C, die relative Luftfeuchtigkeit von 10 bis 70 % variiert werden.

## 5.2 Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Versuche erfolgte in folgenden Schritten, auf die nachfolgend näher eingegangen werden soll:

### a) Probenvorbereitung

Das Ziel der **Probenvorbereitung** bestand darin, den während der Produktion der Kunststoffe angelagerten Staub zu entfernen und die eventuell vorhandenen Ladungen zu neutralisieren. Deshalb wurden die Proben zweimal 2 min lang in 2,5 l entionisiertem Wasser in einem Glasbehälter gewaschen. Nach dem Waschen erfolgte die Trocknung der Granulate in einem Trockenschrank ca. 16 h lang bei 50 °C.

Auf den so vorbereiteten Proben konnten bei Kontrollversuchen keine bzw. nur sehr geringe Ladungen nachgewiesen werden.

### b) Konditionierung des Probenmaterials

Nach der Trocknung wurde die Probe vorsichtig in die Aufladungseinheit aufgegeben und mit der **Konditionierung** begonnen. Dabei durchströmte die konditionierte Luft die Schüttung bei vorgegebener relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur mit einer bestimmten Geschwindigkeit. Während der Konditionierung stellte sich ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen der Feuchtigkeit in der Konditionierungsluft und auf der Kunststoffoberfläche ein.

In der Literatur sind bis zur Einstellung eines Gleichgewichtszustandes zwischen Feuchtigkeit auf der Kunststoffoberfläche und relativer Luftfeuchtigkeit der Konditionierluft Zeiträume im Sekundenbereich angegeben [144]. Bei einigen Kunststoffen bildet sich eine Quellschicht an der Kunststoffoberfläche aus. Die Diffusion des Wassers in die Volumenphase nimmt wesentlich mehr Zeit in Anspruch (siehe 4.2). Für die triboelektrische Aufladung sind die Oberflächenzustände relevant. Deshalb ist ein Gleichgewichtszustand an der Kunststoffoberfläche für die Aufladung wichtig.

Für die Bestimmung der notwendigen Konditionierungszeit lud Mientkewitz [14] Kunststoffgemische, die auch in der vorliegenden Arbeit Verwendung fanden, nach unterschiedlich langer Konditionierung auf. Es war keine Abhängigkeit zwischen der Dauer der Konditionierung und der Ladungshöhe zu erkennen. Die Ergebnisse deuteten darauf hin, dass sich ein Gleichgewichtszustand der Feuchte innerhalb von sehr kurzer Zeit einstellte.

Für die Untersuchungen legte man eine Konditionierungszeit von  $t_A = 30$  min fest.

### c) Triboelektrische Aufladung des Kunststoffes

Zur *triboelektrischen Aufladung* der Kunststoffteilchen wurde die Luftgeschwindigkeit in der Aufladungseinheit erhöht. Es bildete sich eine Wirbelschicht aus, in der sich die Kunststoffteilchen durch Kontakt und Reibung miteinander und mit der Wandung der Wirbelkammer aufluden. Bei Nutzung der In-Stream-Ladungsmessung wurde die Sonde durch eine Öffnung vor Beginn der Aufladung in die Wirbelkammer eingebracht und während der Aufladung die Signalbildung beobachtet.

Für die Untersuchung des Einflusses der Probenmasse und der Strömungsgeschwindigkeit der Luft auf die Aufladung wurde PS verwendet. PS besitzt nach Literaturangaben eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Änderungen der Aufladungsbedingungen [56].

#### • Einfluss der Probenmasse

Eine unterschiedliche Feststoffkonzentration in der Wirbelschicht kann verschiedene Aufladungszustände verursachen, was mit der veränderten Kontaktierungswahrscheinlichkeit mit der Metallwand im Zusammenhang stehen soll. Um dieses Verhalten nachzuweisen, erfolgte die Aufladung von PS-Proben mit verschiedenen Probenmassen in einer Wirbelkammer mit goldbeschichteter Wandung. Die Ergebnisse sind in den **Bildern 50** und **51** dargestellt.

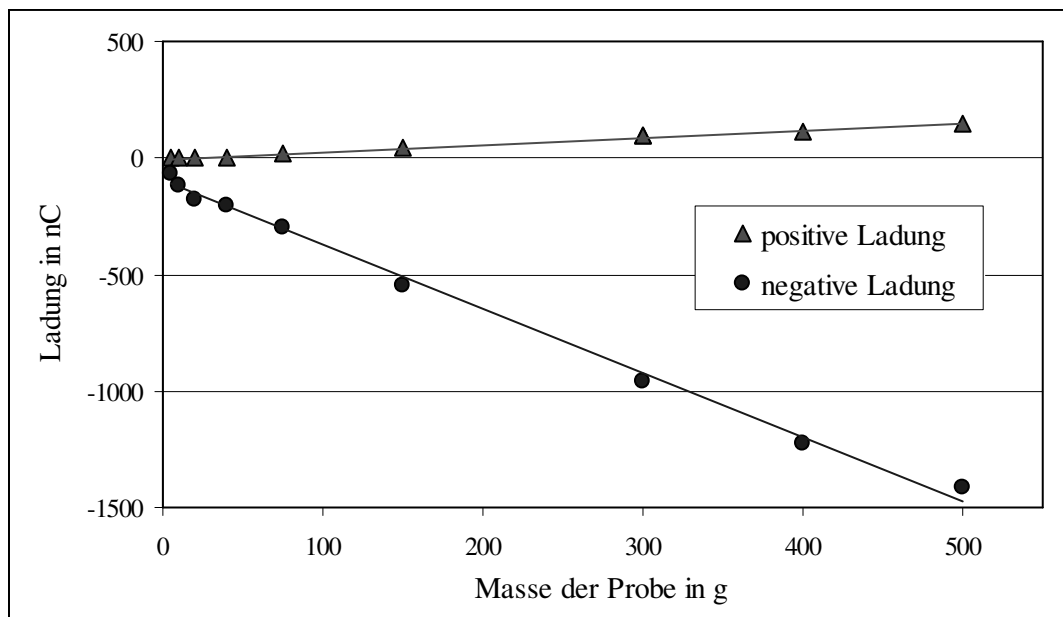


Bild 50: Aufladung von PS in Abhängigkeit von der Probenmasse

Aufladungszeit:  $t_A = 4$  min; Aufladungseinheit: Wirbelapparat mit goldbeschichteter Wandung

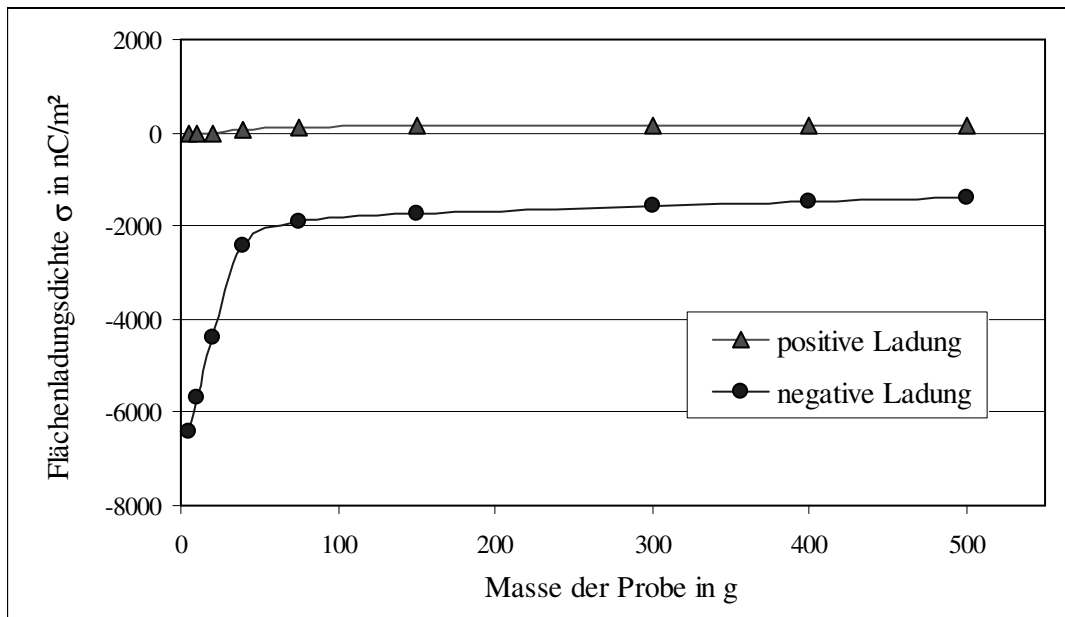


Bild 51: Flächenladungsdichte von PS in Abhängigkeit von der Probenmasse

Aufladungszeit:  $t_A = 4$  min; Aufladungseinheit: Wirbelapparat mit goldbeschichteter Wandung

Wie erwartet, nahm die gemessene Ladung mit zunehmender Probenmasse zu (**Bild 50**). Demgegenüber verringerte sich die Flächenladungsdichte mit zunehmender Probenmasse deutlich (**Bild 51**). Die bei geringer Probenmasse hohe Aufladung deutet darauf hin, dass die Anzahl der Teilchenkontakte mit der Metallwand bei geringer Probenmasse höher ist bzw. die Entladungserscheinungen erst bei höheren Flächenladungsdichten auftreten.

Für die nachfolgenden Aufladungsversuche legte man eine Probenmasse von 300 g fest, sodass eine einheitliche Feststoffkonzentration in der Wirbelschicht gewährleistet war.

#### • Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit der Luft

Durch Änderung der Strömungsgeschwindigkeit der Luft in der Wirbelschicht kann die Kontaktierungsintensität bzw. Kontaktanzahl pro Zeiteinheit mit der Metallwandung variiert werden. Eine Erhöhung der Intensität bewirkt, dass die Kontaktflächen näher zu einander kommen, was den Ladungstransport begünstigt.

Die angegebene Strömungsgeschwindigkeit bezieht sich auf den Leerquerschnitt der Wirbelkammer. Die Ergebnisse sind in **Bild 52** dargestellt. Die geringste eingestellte Luftgeschwindigkeit von  $w_L = 2$  m/s lag wenig oberhalb des Wirbelpunkts. Wie zu erwarten war, nahm die Flächenladungsdichte mit zunehmender Luftgeschwindigkeit zunächst zu. Oberhalb von ca. 6 m/s Luftgeschwindigkeit konnte man eine Ansammlung von Kunststoffteilchen im oberen trichterförmigen Bereich der Wirbelkammer beobachten. Diese Teilchen waren am Aufladungsvorgang ggf. nur eingeschränkt beteiligt, was zur Abnahme der Flächenladungsdichte führte. Die höchste Luftgeschwindigkeit war durch den Austrag der Teilchen aus der Wirbelschicht begrenzt. Ein Siebbeleg verhinderte jedoch, dass die Teilchen aus der Wirbelkammer ausgetragen werden.

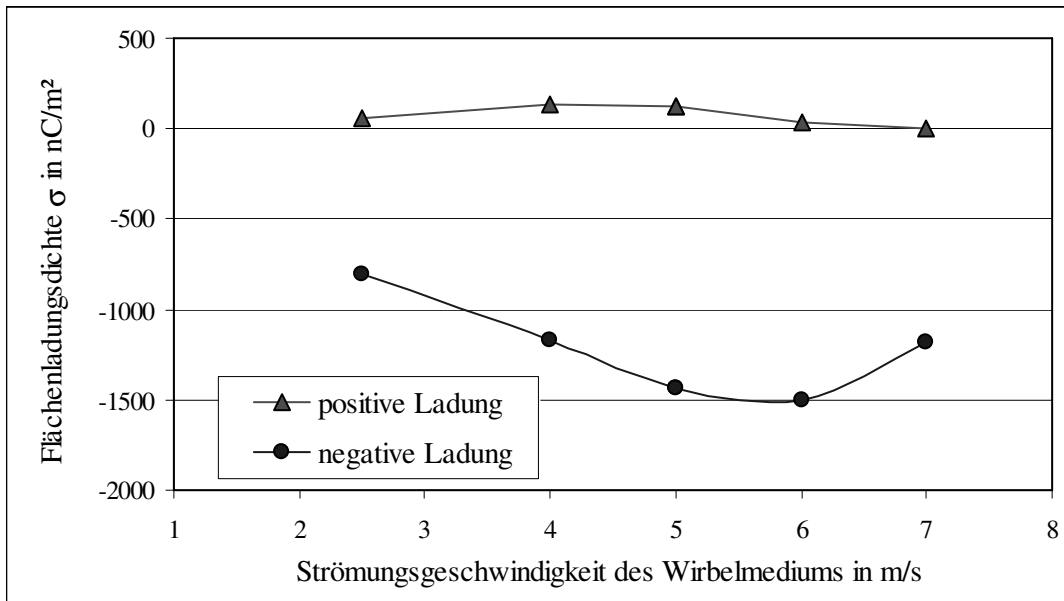


Bild 52: Flächenladungsdichte von PS in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit in der Wirbelschicht

Aufladungszeit:  $t_A = 4$  min; Aufladungseinheit: Wirbelapparat mit goldbeschichteter Wandung

Als Standardeinstellung der Luftgeschwindigkeit wurde  $w_L = 5$  m/s gewählt. Bei dieser Geschwindigkeit war die Wirbelschicht bereits ausgebildet, aber es erfolgte noch keine Ansammlung der Kunststoffteilchen im oberen trichterförmigen Bereich der Wirbelkammer.

#### • Einfluss der Aufladungsdauer

Die triboelektrische Aufladung ist ein zeitabhängiger Vorgang. Vorversuche zur Aufladungskinetik haben gezeigt, dass sich ein Gleichgewichtszustand innerhalb von ca. 4 min Aufladungszeit bei den meisten Kunststoffen einstellt (siehe noch **6.2.2.1**). Für die Aufladungsdauer wurde eine Standardeinstellung von  $t_A = 4$  min gewählt.

#### d) Trennung im elektrostatischen Freifallscheider

Nach einer festgelegten Aufladungszeit wurde die Austragsöffnung am Boden der Wirbelkammer geöffnet. Die **Trennung** der Kunststoffteilchen fand zwischen den Elektroden statt, indem die Teilchen je nach ihrer Ladungspolarität ausgelenkt wurden und in die entsprechenden Auffangbehälter gelangten. Die obere Grenze der elektrischen Feldstärke zwischen den Elektroden des Freifallscheiders ist durch die Durchbruchfeldstärke der Luft begrenzt. Wegen Unebenheiten an der Elektrode, die zur partiellen Erhöhung der Feldstärke führen, wird bei technischen Trennungen im elektrostatischen Feld eine maximale Feldstärke von 4 bis 5 kV/cm verwendet. Ausgehend von einer Feldstärke von ca. 4,5 kV/cm zwischen den Oberkanten der Elektroden sowie der verwendeten Elektrodenanordnung legte man eine Spannung von +72 kV an die positive und -72 kV an die negative Elektrode des Freifallscheiders.

Fiel ein Teilchen auf die Kante einer Trennwand zwischen zwei Auffangbehältern, prallte es von dort ab und konnte folglich in einen falschen Auffangbehälter gelangen. Die fehlgeleiteten Teilchen bezeichnet man als sogenanntes Spritzkorn. Die Entstehungswahrscheinlichkeit des Spritzkorns hängt vom Teilchendurchmesser und von der Gestaltung der Trennwand ab. Es ergibt sich bei einem Teilchendurchmesser von  $d = 3 \text{ mm}$ , bei 7 Trennwänden, einer Gesamtlänge des Auffangkasten  $l = 756 \text{ mm}$  und einer Rückprallwahrscheinlichkeit der Teilchen von  $\Phi_{\text{Rück}} = 50 \%$  folgender Spritzkornanteil  $H$ :

$$H = \frac{7 \cdot d}{l} \cdot \Phi_{\text{Rück}} \cdot 100\% = 1,4\% \quad (15)$$

Bei einer Probenmasse von 300 g entstehen demnach 4,2 g Spritzkorn. Wegen seiner relativ geringen Menge wurde bei der Auswertung der Fehlaustrag infolge Spritzkorn nicht berücksichtigt.

### e) Ladungsmessung

Die getrennten Kunststoffteilchen wurden in den Auffangbehältern, die als Faraday-Becher ausgebildet sind, aufgefangen, ihre **Ladung** gemessen und dokumentiert.

Die Ladungsmessung wurde regelmäßig nach dem in **Bild 53** skizzierten Schaltkreis überprüft.

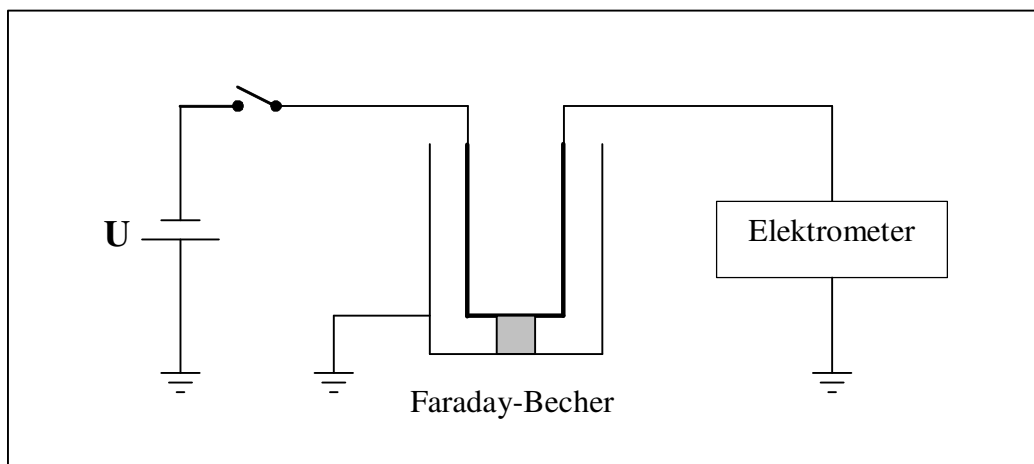


Bild 53: Schaltbild zur Überprüfung der Ladungsmessung

Die Überprüfung eines Faraday-Bechers gestaltete sich wie folgt: Zunächst legte man an den Faraday-Becher für eine festgelegte Zeitdauer eine definierte Gleichspannung an. Der Faraday-Becher lud sich dabei auf. Nach bestimmten zeitlichen Abständen erfasste man diese Ladungsmenge mit dem Elektrometer. Dieser Vorgang wurde mit jedem einzelnen Faraday-Becher durchgeführt. Ein Beispiel der Messergebnisse zeigt **Bild 54**.

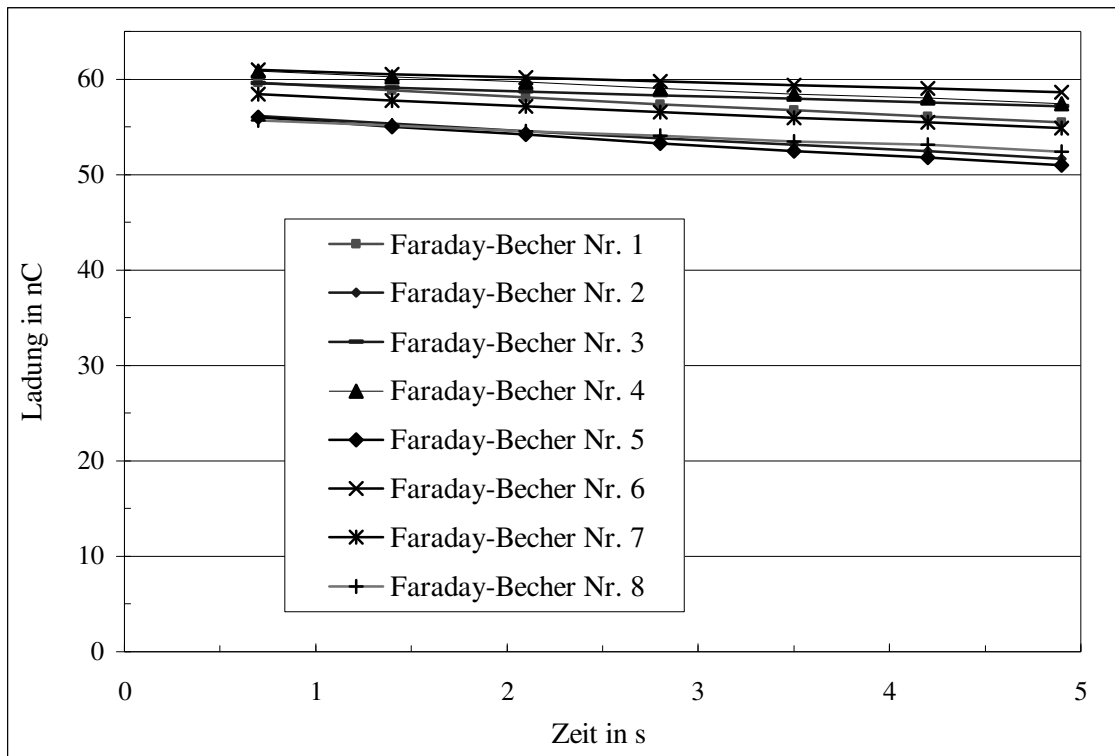


Bild 54: Abfluss der Ladungen aus den Faraday-Bechern

Es wird deutlich, dass die Ladungen mit der Zeit aus den Bechern abfließen. Außerdem ist trotz identischer Geometrie und Gestaltung der einzelnen Becher eine Abweichung zwischen den Abflussraten zu beobachten. Um diese Abweichung zu kompensieren, wurde die zu jenem Becher gehörende Messreihe mit der geringsten abfließenden Ladungsmenge als Bezugsgröße gewählt. Die Korrekturfaktoren zu den einzelnen Bechern ergaben sich aus dem Verhältnis der gemessenen Ladung in einem Becher und der Ladung des Bezugsbeckers.

#### f) Analyse der entstehenden Produkte

Die *Analyse der Produkte* erfolgte durch Auswiegen der Massen in den einzelnen Auffangbehältern. Bei der Untersuchung von Gemischen mussten die Gemischkomponenten in den einzelnen Auffangbehältern von Hand getrennt werden.

#### Standardbedingungen für die nachfolgenden Experimente

Auf der Grundlage der durchgeführten Vorversuche wurden folgende *Standardbedingungen* für die nachfolgenden Experimente festgelegt:

- Masse der Kunststoffproben:  $m = 300 \text{ g}$  (bei Zweikomponenten-Gemischen mit einem Masseverhältnis der Komponenten von 1 : 1 und bei Mehrkomponenten-Gemischen mit einem Masseverhältnis der Komponenten von 1 : 1 : 1 ... )
- Temperatur der Konditionierluft:  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Dauer der Konditionierung: 30 min
- Aufladungsdauer: 4 min



- Luftgeschwindigkeit bezogen auf den Leerquerschnitt der Wirbelkammer:  
während der Konditionierung: 1 m/s  
während der Aufladung: 5 m/s
- Spannung an den Elektroden: positive Elektrode: +72 kV  
negative Elektrode: -72 kV  
elektrische Feldstärke an der oberen Kante der Elektroden: ca. 4,5 kV/cm  
elektrische Feldstärke an der unteren Kante der Elektroden: ca. 2 kV/cm.

### 5.3 Methodik der Versuchsauswertung

Als Grundlage für die Auswertung der Trennversuche standen die aus den Versuchen erhaltenen Masse- und Ladungsverteilungen der Kunststoffproben in den Auffangbehältern zur Verfügung (**Bild 55 a** und **b**). Für die Darstellung der Höhe der spezifischen triboelektrischen Aufladung bieten sich die massebezogene Ladung mit der SI-Einheit C/g und die flächenbezogene Ladung (Flächenladungsdichte) mit der SI-Einheit C/m<sup>2</sup> an.

Die Ermittlung der massebezogenen Ladung wird üblicherweise dann verwendet, wenn die Kunststoffprobe als Pulver vorliegt bzw. die Kunststoffteilchen eine unregelmäßige Form besitzen, weil die Oberfläche nur mit erheblichem Fehler ermittelt werden kann.

Die untersuchten Kunststoffteilchen besaßen eine regelmäßige Form. So konnte man die flächenbezogene Ladung berechnen. Diese Darstellung ermöglicht einen direkten Vergleich des Ladungszustandes mit den meisten Literaturwerten und dem theoretisch maximalen Wert. Die Berechnung erfolgte durch eine getrennte Summation der positiven und negativen Ladungen, bezogen auf die Gesamtoberfläche der Kunststoffprobe und wurde als Flächenladungsdichte angegeben.

Ein Beispiel für die Berechnung der Flächenladungsdichte von ***Einkomponenten-Kunststoffproben*** zeigt **Bild 55**. PVC wurde bei  $\phi = 30 \%$  in der Wirbelkammer mit artgleicher PVC-Wandung 2 min lang aufgeladen. Die Berechnung verdeutlicht, dass die PVC-Probe wesentlich mehr negative Ladung besitzt als positive. Die mögliche Ursache dafür wird in Kapitel **6.2.1** diskutiert.

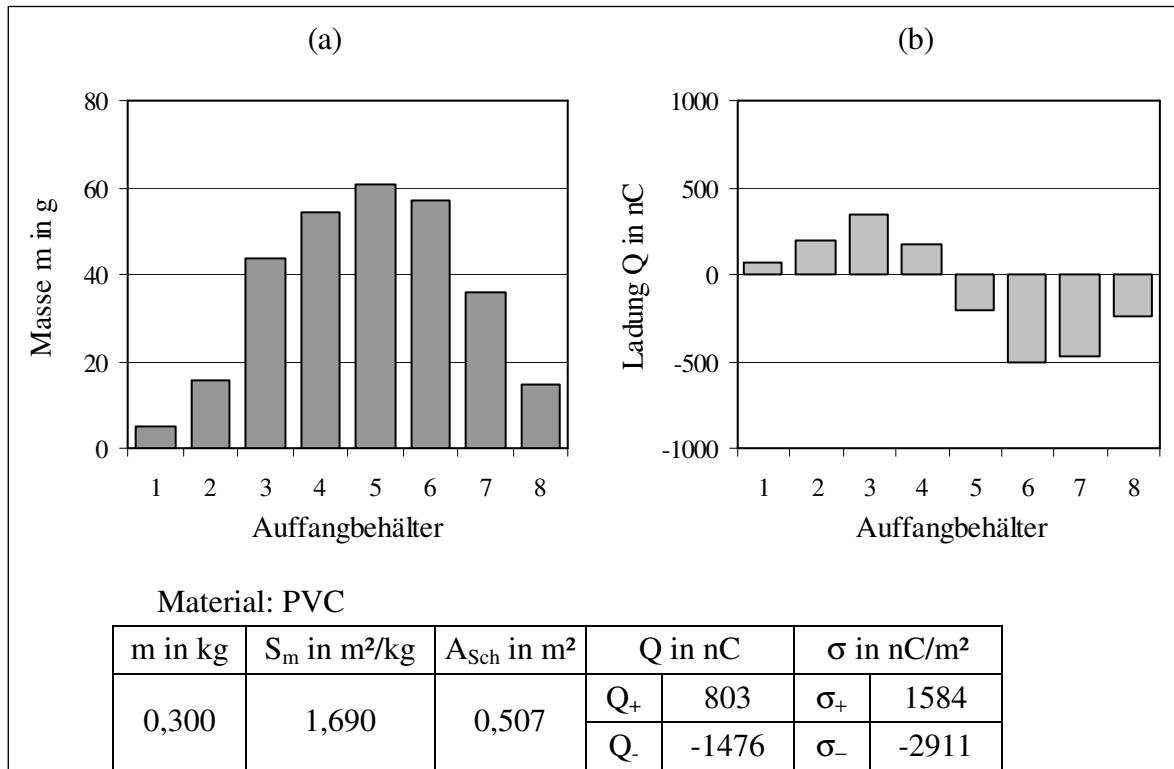


Bild 55: Beispiel für die Ermittlung der Flächenladungsdichte bei Einkomponentenschüttungen  
(a) Masseverteilung, (b) Ladungsverteilung

**Bild 56** zeigt den Zusammenhang zwischen Auslenkung und Flächenladungsdichte für PVC. Erwartungsgemäß wurden die Teilchen mit stärkerer Aufladung weiter ausgelenkt.

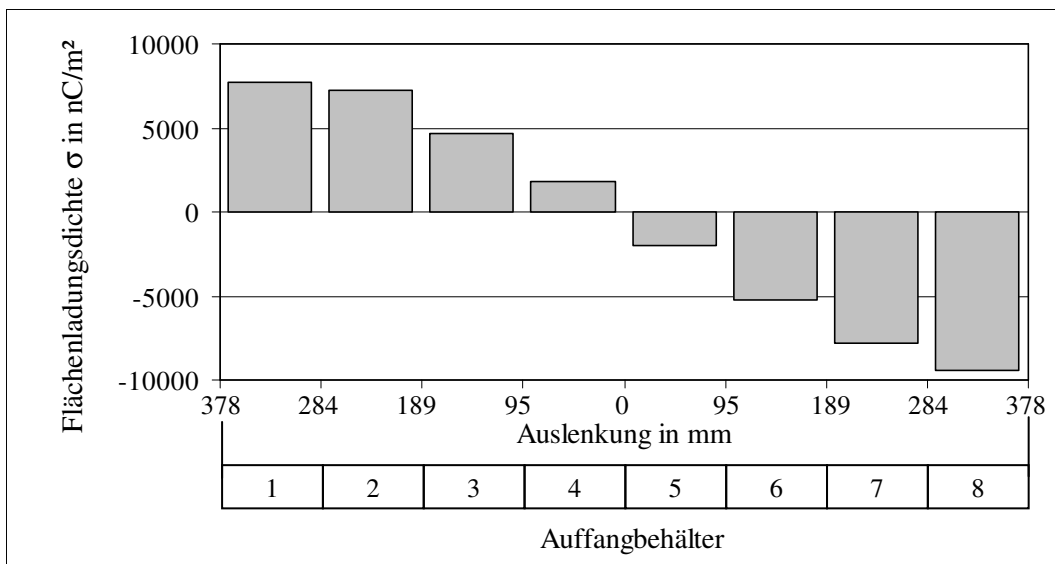


Bild 56: Zusammenhang zwischen Auslenkung und Aufladung für den in **Bild 55** dargestellten Versuch mit PVC

Für die Charakterisierung der Aufladung in **Zwei- und Mehrkomponenten-Gemischen** war neben der Masse und der Ladung auch die Zusammensetzung in den Auffangbehältern

durch manuelles Trennen der Komponenten zu bestimmen. Daraus wurde für jede Komponente die mittlere Flächenladungsdichte ermittelt.

Ein Berechnungsbeispiel für ein Zweikomponenten-Gemisch ist in **Bild 57** dargestellt.

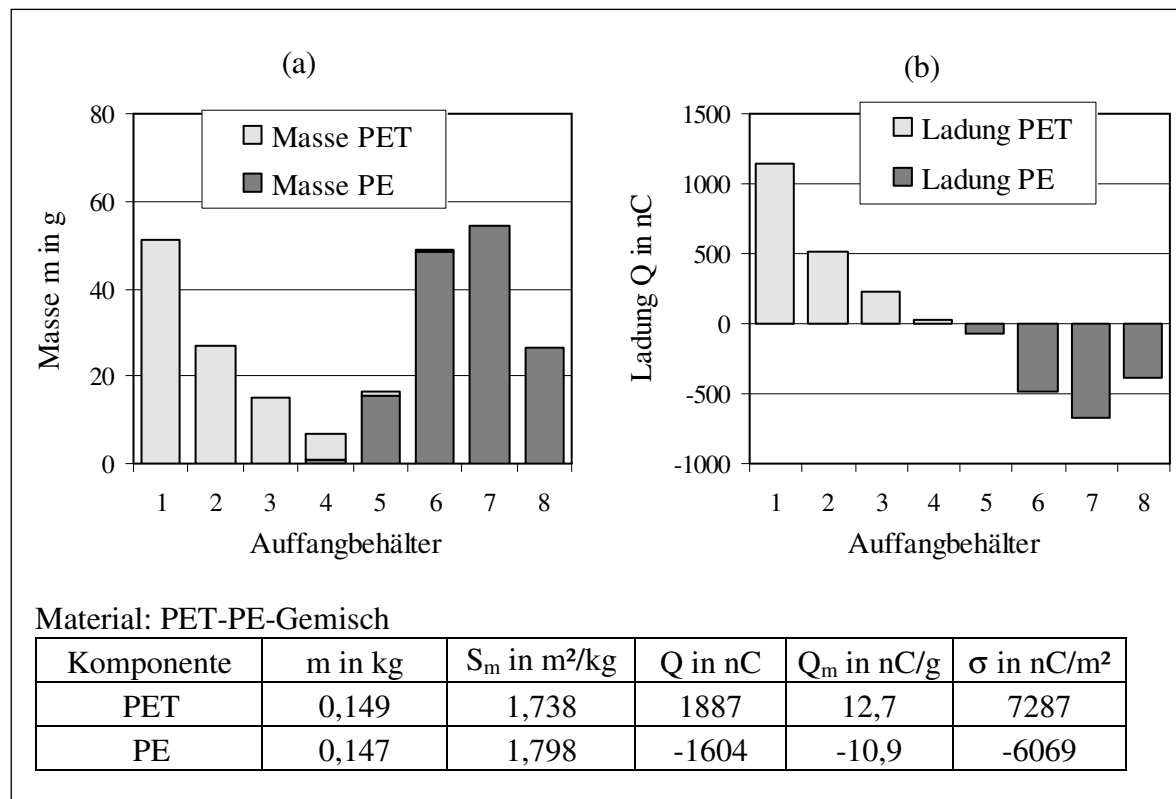


Bild 57: Beispiel für die Ermittlung der Flächenladungsdichte bei einem Zweikomponenten-Gemisch  
(a) Masseverteilung, (b) Ladungsverteilung

Die Auslenkung der Teilchen in die Auffangbehälter korreliert mit ihrer mittleren Flächenladungsdichte (**Bild 58**).

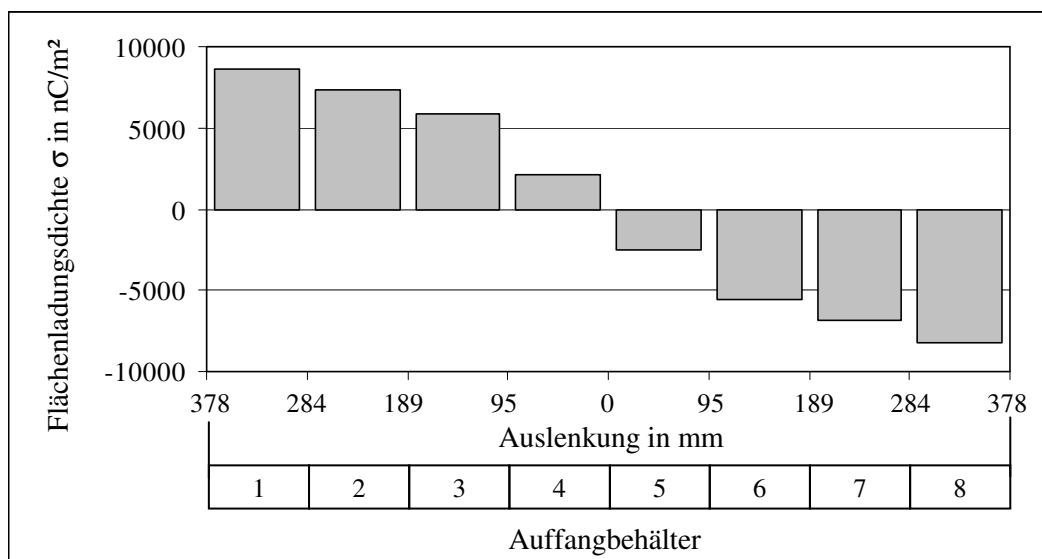


Bild 58: Zusammenhang zwischen Auslenkung und Aufladung für den in **Bild 57** dargestellten Versuch

## 5.4 Fehlerbetrachtung

Die Messung von physikalischen Größen ist grundsätzlich fehlerbehaftet. Je nach Ursache der Abweichung vom wahren Wert unterscheidet man grobe, systematische und zufällige Fehler. Grobe Fehler können z. B. durch starke äußere Einflüsse oder beim falschen Ablesen entstehen. Sie sind als Ausreißer erkennbar, die eliminiert werden können. Systematische Fehler entstehen z. B. durch Kalibrierfehler oder Funktionsfehler der Messgeräte. Bei der Wiederholung eines Versuchs unter gleichen Bedingungen sind Größe und Vorzeichen eines systematischen Fehlers gleichbleibend. Zufällige Fehler haben dagegen einen statistischen Charakter, wobei die Messwerte unter den gleichen Bedingungen um einen Mittelwert streuen. Sie sind durch eine Mittelwertbildung aus einer genügend großen Anzahl von Messwerten zu eliminieren bzw. zu verringern.

In **Tabelle 9** sind die systematischen und zufälligen Fehler der gemessenen Größen aufgelistet. Die Beträge der systematischen Fehler wurden aus den Unterlagen der Messgeräte entnommen, die zufälligen Fehler wurden geschätzt.

Tabelle 9: Systematische und zufällige Fehler der Messgrößen

Systematische Fehler	
Messgröße	Fehler
Temperatur $t$	0,1 %
relative Luftfeuchtigkeit $\phi$	2 % rel. Feuchte
Luftgeschwindigkeit $w_{WM}$	2 %
Spannung an den Elektroden $U$	0,02 %
Ladung $Q$	0,025 %
Zufällige Fehler	
Messgröße	Fehler
Temperatur $t$	2 °C
relative Luftfeuchtigkeit $\phi$	3 % rel. Feuchte
Luftgeschwindigkeit $w_{WM}$	0,2 m/s
Aufladungszeit $t_A$	5 s
Spannung an den Elektroden $U$	2 kV
Kunststoffmasse in den Auffangbehältern $m$	0,05 g
Ladung $Q$	10 %
Oberfläche eines Teilchens $A_P$	8 %
Einzelkornmasse $m_P$	0,35 %

Systematische Fehler sind nicht Gegenstand einer Fehlerberechnung.

Für die Berechnung zufälliger Fehler von einer Messreihe bieten sich statistische Kennwerte (Mittelwert  $\bar{x}$ , Standardabweichung  $s$  und Vertrauensbereich des Mittelwertes  $\Delta\bar{x}$ ) an [156].

Für den Mittelwert gilt:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (16)$$

wo  $x_i$  die Messwerte und  $n$  die Anzahl der Messwerte sind.

Die Standardabweichung berechnet man mit der Gleichung:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

Für die Zuverlässigkeit des Mittelwertes ist der Vertrauensbereich des Mittelwertes  $\Delta\bar{x}$  maßgebend:

$$\Delta\bar{x} = \frac{t}{\sqrt{n}} s, \quad (18)$$

wobei der Faktor  $t$  von der gewählten statistischen Sicherheit und der Anzahl der Messungen abhängt.

Berechnet man die gesuchte Größe aus fehlerbehafteten Messgrößen, wird der errechnete Funktionswert wieder fehlerbehaftet. Den mittleren Fehler des Funktionswertes  $\Delta\bar{F}$  kann man mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz von Gauß ermitteln:

$$\Delta\bar{F} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \Delta\bar{x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \Delta\bar{y}\right)^2 + \dots}, \quad (19)$$

wo  $\Delta\bar{x}$ ,  $\Delta\bar{y}$  usw. den Vertrauensbereich des Mittelwertes der einzelnen Messgrößen und  $\frac{\partial F}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial F}{\partial y}$  usw. partielle Ableitungen der Funktion  $F = F(x, y, \dots)$  darstellen.

Um mit Sicherheit den wahren Wert mit den ermittelten Fehlergrenzen einzuschließen, berechnet man den maximalen Fehler des Funktionswertes  $\Delta F$ . Er wird auch dann verwendet, wenn man von geschätzten Fehlern der Messgrößen ausgeht. Es gilt:

$$\Delta F = \pm \left( \left| \frac{\partial F}{\partial x} \Delta\bar{x} \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial y} \Delta\bar{y} \right| + \dots \right), \quad (20)$$

wo  $\Delta\bar{x}$ ,  $\Delta\bar{y}$  usw. der Vertrauensbereich des Mittelwertes oder der geschätzte Fehler der einzelnen Messgrößen ist.

Aus der Literatur ist bekannt, dass die triboelektrische Aufladung mit starken Streuungen verbunden ist [10, 56, 95]. Die Ursachen dafür liegen oft in den undefinierten Versuchsparametern (wie z. B. relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur). Außerdem können die Eigen-

schaften einer Kunststoffsorte infolge verschiedener Additive, Alterungserscheinungen oder Kontaminationen an der Oberfläche sehr von einander abweichen. *Lowell* und *Akande* [56], die Kunststoffe in Vakuum gegen Metall kontaktierten, fanden dagegen einen eindeutigen Beweis dafür, dass die Streuung der Aufladung bei Metall-Kunststoff-Einzelkontakten mit der Variation der Eigenschaften an der Kunststoffoberfläche verbunden ist, was als Folge einer Kontamination zu sehen sei.

Für die Ermittlungen der Streuung der Aufladung in der Wirbelkammer wurde als Versuchsmaterial PS gewählt, von dem nach [56] die höchste Streuung zu erwarten war. Über einen sehr langen Zeitraum wurden unter Standardbedingungen Wiederholungsversuche unter Verwendung einer Wirbelkammer aus Aluminium und einer goldbeschichteten Wirbelkammer durchgeführt. Die Schwankung der Aufladung des PS ist in den **Bildern 59** und **60** dargestellt.

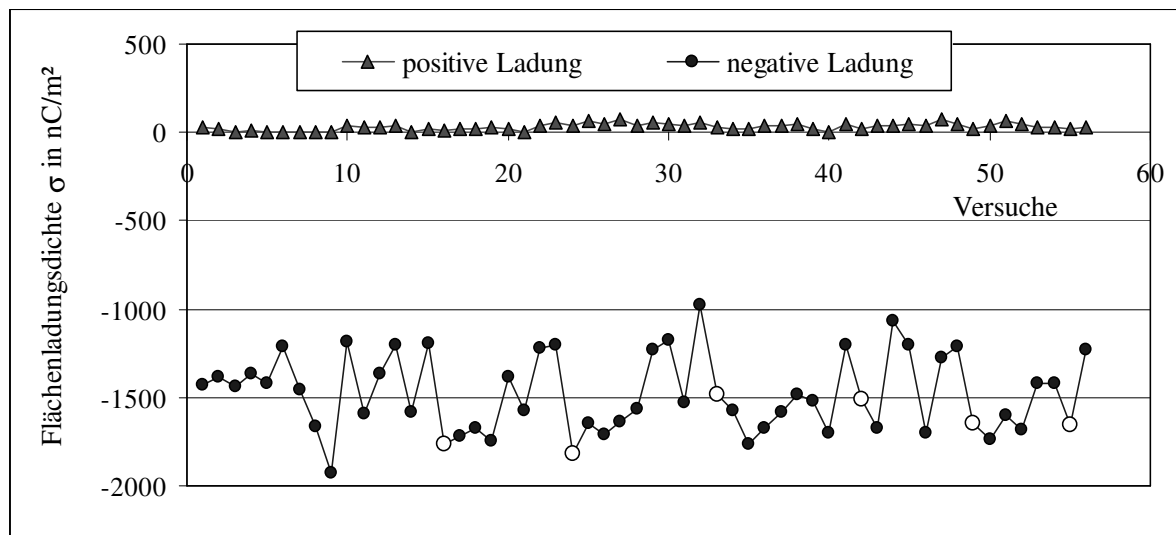


Bild 59: Schwankung der Aufladung des PS in einer Wirbelkammer mit Aluminium-Wandung

Vor den mit ○ markierten Versuchen wurde die Oberfläche der Wirbelkammer neu geschliffen

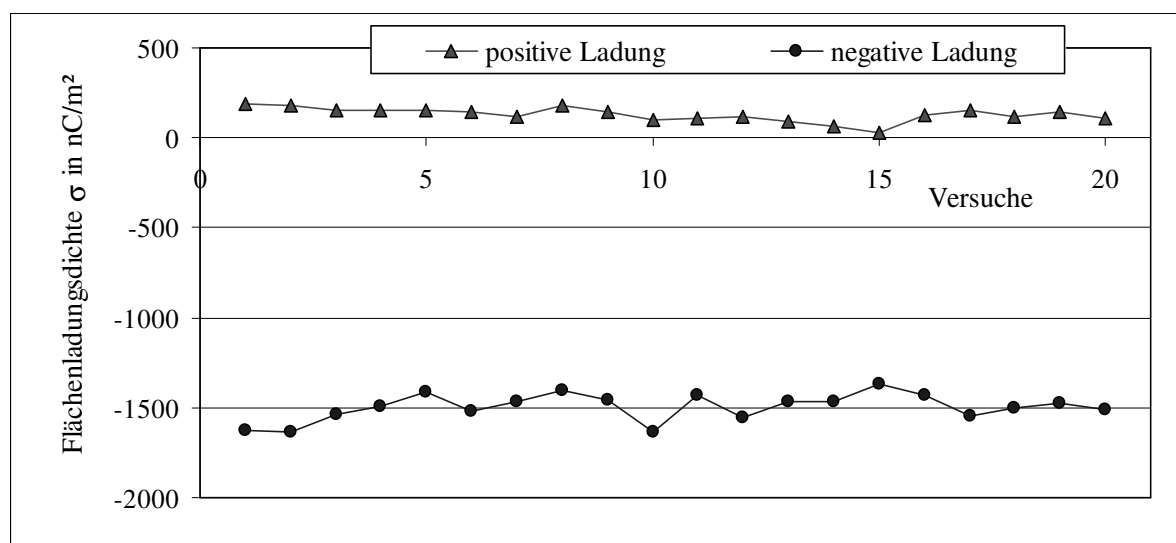


Bild 60: Schwankung der Aufladung des PS in einer goldbeschichteten Wirbelkammer

Im Rahmen der Fehlerbetrachtung wurden zunächst die statistischen Kennwerte Mittelwert und Standardabweichung der Einzelwerte berechnet (**Tabelle 10**).

Tabelle 10: Mittelwert  $\bar{x}$  und Standardabweichung  $s$  der Aufladung bei den Wiederholungsversuchen mit PS

Wandmaterial der Wirbelkammer	Versuchsanzahl $n$	$\sigma_+$ in nC/m <sup>2</sup>		$\sigma_-$ in nC/m <sup>2</sup>	
		$\bar{x}$	$s$	$\bar{x}$	$s$
Aluminium	56	31	19	-1482	216
mit Gold beschichtet	20	129	38	-1498	74

Die Messwerte streuten bei der Aufladung des PS in der Al-Wirbelkammer deutlich mehr. Das dürfte darauf zurückzuführen sein, dass sich auf der Oberfläche des Aluminiums im Gegensatz zur goldbeschichteten Wandung eine Oxidschicht ausbildete, die selbst den Ladungsübergang beeinflusste. Betrachtet man die Messwerte jener Versuche, bei denen vor Versuchsbeginn die Wandung der Al-Wirbelkammer neu geschliffen und damit ein Teil der Oxidschicht entfernt wurde, ist eine geringere Streuung zu erkennen (s. **Bild 59**). Eine vollständige Entfernung der Oxidschicht war allerdings unter atmosphärischen Bedingungen nicht realisierbar.

Die Vertrauensbereiche der Mittelwerte der Flächenladungsdichte sind bei einer statistischen Sicherheit von  $P = 95 \%$  in **Tabelle 11** angegeben. Der Faktor  $t$  entspricht für  $n = 56$  einem Wert von  $t = 2,015$  und für  $n = 20$  einem Wert von  $t = 2,093$  [152]. Es wird deutlich, dass bei den Versuchen in der Aluminium-Wirbelkammer der Vertrauensbereich der negativen Flächenladungsdichte trotz höherer Versuchsanzahl immer etwas größer ist, als bei den Versuchen in der goldbeschichteten Wirbelkammer.

Tabelle 11: Vertrauensbereich der Mittelwerte der Flächenladungsdichte bei den Wiederholungsversuchen mit PS

Wandmaterial der Wirbelkammer	Flächenladungsdichte	untere Grenze des Vertrauensbereichs in nC/m <sup>2</sup>	Mittelwert in nC/m <sup>2</sup>	obere Grenze des Vertrauensbereichs in nC/m <sup>2</sup>
Aluminium	$\sigma_+$	26	31	36
	$\sigma_-$	-1540	-1482	-1424
mit Gold beschichtet	$\sigma_+$	111	129	147
	$\sigma_-$	-1533	-1498	-1463

Für die Berechnung der Flächenladungsdichte gilt:

$$\sigma = \frac{Q}{m \cdot S_m} = \frac{Q \cdot m_p}{m \cdot A_p} \quad (21)$$

Der maximale Fehler der Flächenladungsdichte nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz lautet:

$$\Delta\sigma = \pm \left( \left| \frac{m_p}{m \cdot A_p} \Delta Q \right| + \left| \frac{Q}{m \cdot A_p} \Delta m_p \right| + \left| \frac{Q \cdot m_p}{m^2 \cdot A_p} \Delta m \right| + \left| \frac{Q \cdot m_p}{m \cdot A_p^2} \Delta A_p \right| \right) \quad (22)$$

Berechnungsbeispiel:

Nach einer Aufladung und anschließender Trennung in einem elektrostatischen Feld befanden sich in einem Auffangbehälter  $m = 80$  g Versuchsmaterial PS ( $m_p = 17,42 \cdot 10^{-3}$  g;  $A_p = 36,03$  mm<sup>2</sup>). Die gemessene Ladung betrug  $Q = -240$  nC.

Der mit Gleichung (22) berechnete maximale Fehler beträgt  $\pm 268$  nC/m<sup>2</sup>. Daraus folgt für die Flächenladungsdichte:  $\sigma = -1450 \pm 268$  nC/m<sup>2</sup>.

Geht man vom berechneten maximalen Fehler von  $\Delta\sigma = \pm 19$  % aus, liegen ca. 90 % der Messwerte bei der Aufladung in der Al-Wirbelkammer innerhalb des Fehlerbereiches. Bei einer Aufladung in der mit Gold beschichteter Wirbelkammer liegt diese Rate bei 100%.

Die Ergebnisse belegen die gute Reproduzierbarkeit der Triboaufladung in der Wirbelschicht.



## 6 Ergebnisse und Diskussion

### 6.1 Vorgänge in der Wirbelschicht

Eine Beschreibung des Aufladungsvorgangs in der Aufladungsapparatur erfordert die Charakterisierung der Vorgänge in der Wirbelschicht.

Der Existenzbereich einer Wirbelschicht ist durch die Lockerungsgeschwindigkeit  $w_L$  (Wirbelpunktlinie) und die Austraggeschwindigkeit  $w_A$  (Austragslinie) der Prozessluft begrenzt (**Bild 61**).

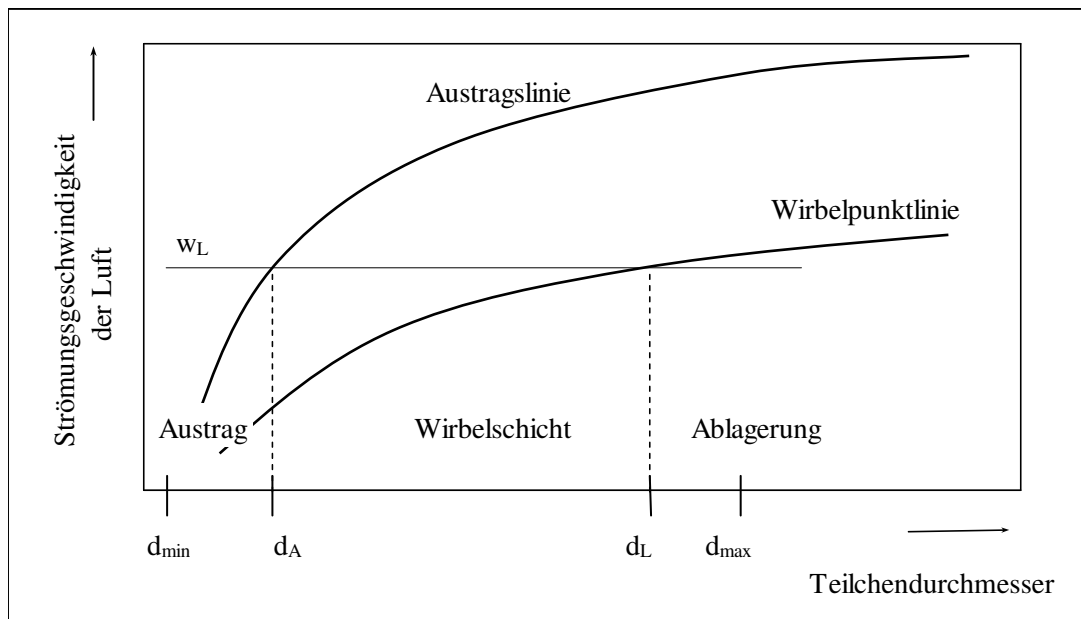


Bild 61: Existenzbereich einer Wirbelschicht nach [148]

Bei einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit  $w_L$  der Luft wird der Feststoff in der Korngrößenklasse  $d_{\max} < d < d_L$  nicht fluidisiert und in der Korngrößenklasse  $d_{\min} > d > d_A$  aus der Wirbelschicht ausgetragen. Die Wirbelschicht wird aus jenen Partikeln gebildet, deren Durchmesser im Bereich  $d_A < d < d_L$  liegt.

Mit Hilfe des Zustandsdiagramms von Reh [147, 148] kann der Existenzbereich einer Wirbelschicht abgeschätzt werden (Berechnung s. **Anlage 1**). Die berechneten Kennwerte sind in **Tabelle 12** zusammengefasst.

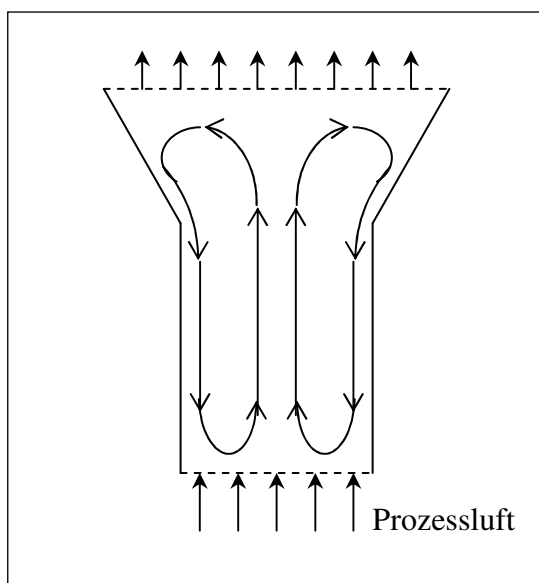
Die Lockerungs- bzw. Austraggeschwindigkeiten der unterschiedlichen Kunststoffe liegen in einem relativ engen Bereich, woraus ein einheitliches Verhalten der Teilchen in der Wirbelschicht zu erwarten war.

Der beobachtete Lockerungspunkt der Schüttungen in der Wirbelkammer lag bei einer Strömungsgeschwindigkeit der Luft von ca. 1 bis 1,6 m/s. Oberhalb einer Luftgeschwindigkeit von 6 m/s sammelten sich bereits einige Teilchen im oberen trichterförmigen Bereich der Wirbelkammer, der mit einem Siebboden abgeschlossen ist.

Tabelle 12: Existenzbereich der Wirbelschicht für die Versuchsmaterialien, berechnet nach dem Reh'schen Zustandsdiagramm

Material	Lockerungsgeschwindigkeit $w_L$ in m/s	Austragsgeschwindigkeit $w_A$ in m/s
PE	1,0	8,7
PP	0,8	9,1
PB	0,8	8,5
PMP	0,7	7,0
PA	0,8	8,0
PS	0,9	8,0
PVC	1,2	8,9
PET	0,9	8,7
POM	0,9	10,1
PMMA	0,9	7,9

In der Wirbelkammer entstand unter Standardbedingungen bei jedem Versuchsmaterial eine stationäre leicht stoßende Wirbelschicht mit innerer Zirkulation (**Bild 62**).



Die Zirkulation wurde durch den trichterförmigen Bereich der Wirbelkammer begünstigt. Während des Aufladungsvorgangs kontaktierten die Teilchen miteinander und mit der Wandung der Wirbelkammer. Die gemessene resultierende Aufladung war folglich das Ergebnis der Kontaktierung zwischen den Teilchen und der Teilchen/Wand-Kontaktierung. Der Anteil der zwei Kontaktierungsformen während eines Aufladungsvorganges war allerdings nicht abschätzbar.

Die Aufladung der Teilchen konnte durch Stoß-, Reibungs- oder Rollkontakt entstehen.

Bild 62: Zirkulation der Teilchen in der Wirbelkammer

Eine kontinuierliche Erfassung des Ladungszustandes in der Wirbelschicht während des Aufladungsvorganges ermöglichte die In-Stream-Ladungsmessung (s. **5.1**). Ein Beispiel für eine mit der In-Stream-Sonde aufgenommene Aufladungskinetik zeigt **Bild 63**.

Die Standardabweichung des Spannungssignals müsste sich proportional zur Ladungshöhe der Teilchen in der Wirbelschicht verhalten. Um eine Quantifizierung zu ermöglichen, wurde die Ladungshöhe der Probe auch in den Faraday-Bechern gemessen und anschließend mit den Ergebnissen der In-Stream-Ladungsmessung verglichen. **Bild 64** zeigt die Korrelation für *Einkomponenten-Kunststoffproben* am Beispiel von POM und PP, die

unter Standardbedingungen unterschiedlich lange in der Wirbelkammer mit metallischer Wandung aufgeladen wurden.

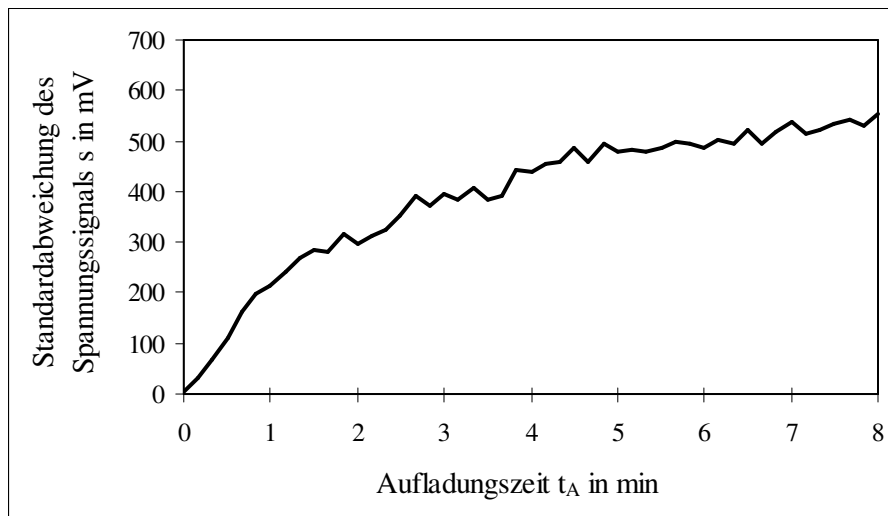


Bild 63: Aufladungskinetik von POM, aufgenommen durch eine In-Stream-Ladungsmessung

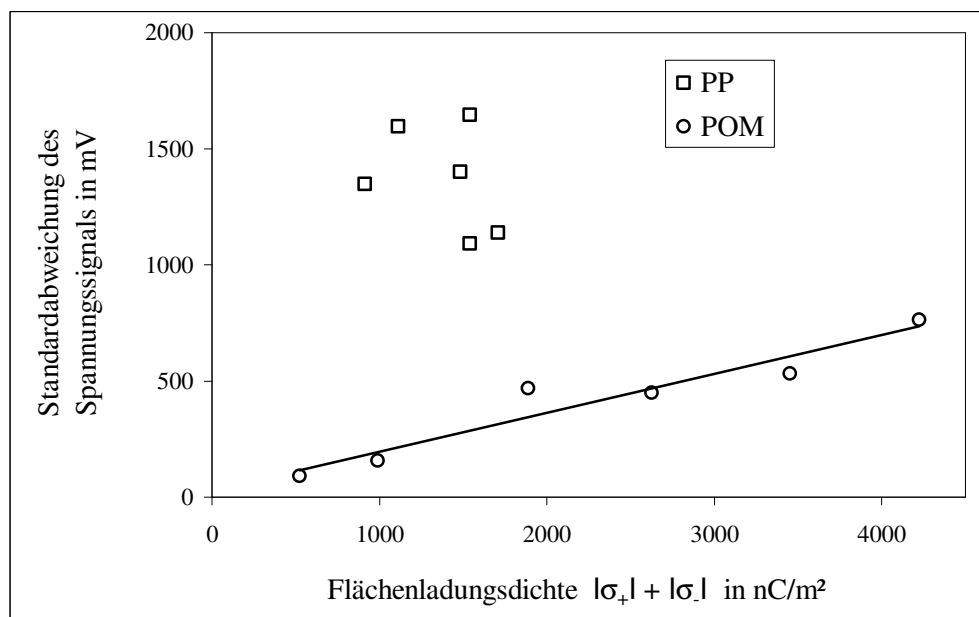


Bild 64: Korrelation zwischen der Ladungsmessung im Faraday-Becher (Flächenladungsdichte) und der In-Stream-Ladungsmessung (Standardabweichung des Spannungssignals) am Beispiel von POM und PP

Aufladungszeiten: 0,5; 1; 2; 4; 8 und 15 min

Während bei POM die Ergebnisse beider Messmethoden gut korrelieren, ist bei PP keine Abhängigkeit erkennbar. Die Ursache liegt in der Entstehung sogenannter Gasentladungen im Aufladungsraum bei PP. Gasentladungen erscheinen im Signalbild als starke Impulse, deren Maxima deutlich über dem üblichen Pegel liegen (**Bild 65**). Diese verfälschen die durch Influenz bedingte für den Aufladungszustand relevante Signalbildung. Sie verändern die berechneten statistischen Kennwerte des Signals, so z. B. die für die Auswertung des Aufladungszustandes benutzte Standardabweichung des Spannungssignals sehr stark. Bei

POM waren keine durch Gasentladungen hervorgerufenen Signalspitzen zu beobachten. Das erfasste Signal trug nur die Information über den Aufladungszustand der Kunststoffteilchen. Das wird durch die gute Korrelation mit der Ladungsmessung mittels Faraday-Becher verdeutlicht.

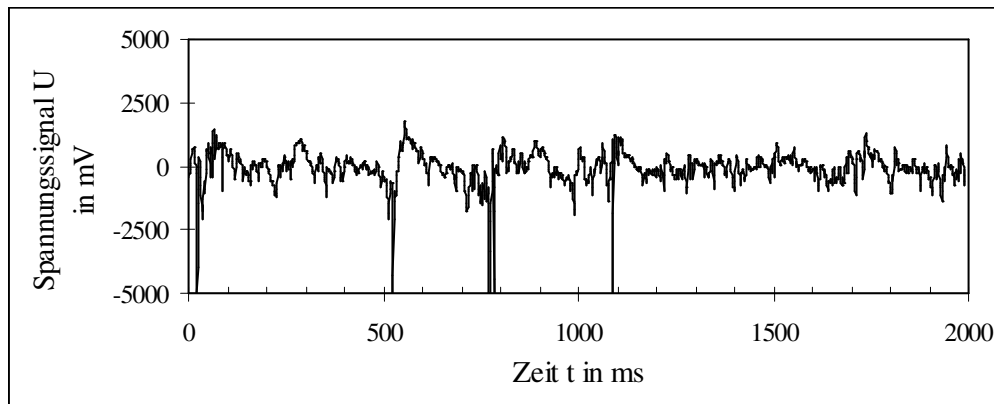


Bild 65: Gasentladungen auf dem Signalbild der In-Stream-Ladungsmessung von PP

Ähnlich intensive Gasentladungen konnte man auch bei der Aufladung der anderen Kunststoffe in einer Einkomponenten-Kunststoffprobe feststellen. Warum das POM eine Ausnahme bildet, liegt vermutlich daran, dass sich POM in der Wirbelschicht stark bipolar auflädt und dadurch die mittlere Ladungsdichte in der Wirbelkammer verringert.

Bei den untersuchten **Zweikomponenten-Gemischen** traten Gasentladungen wesentlich seltener auf, sodass zwischen den zwei Ladungsmessungsmethoden eine Korrelation nachgewiesen werden konnte (**Bild 66**).

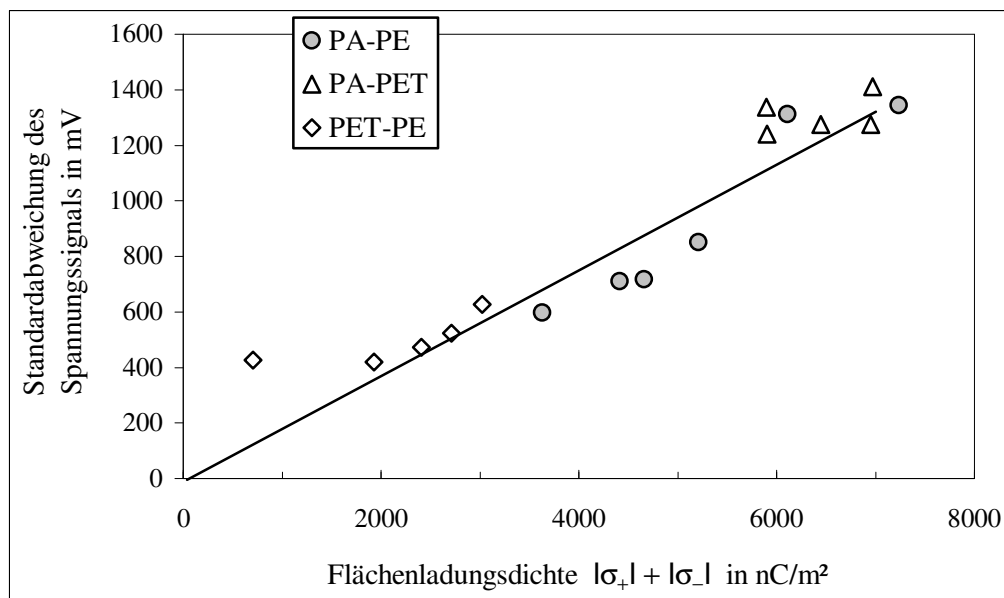


Bild 66: Korrelation zwischen der Ladungsmessung im Faraday-Becher (Flächenladungsdichte) und der In-Stream-Ladungsmessung (Standardabweichung des Spannungssignals) am Beispiel von PA/PE, PA/PET und PET/PE

Es ist vorstellbar, dass auch in einem Zweikomponenten-Gemisch die stoffspezifisch positiv bzw. negativ aufgeladenen Komponenten die mittlere Ladungsdichte in der Wirbelkammer herabsetzen, wodurch es nicht oder nur selten zu Gasentladungen kommt. Diese Aussage würde auch die bei POM festgestellte bipolare Aufladung unterstützen.

Die In-Stream-Ladungsmessung liefert über den Anteil der positiven und negativen Ladungen jedoch keine Informationen. Außerdem beeinträchtigen die auftretenden Gasentladungen die für den Ladungszustand relevante Signalbildung u. U. stark. Es ist weiterhin nicht auszuschließen, dass selbst die Sondenspitze in der Wirbelkammer Gasentladungen hervorruft, die den Aufladungszustand der Kunststoffprobe verändern. Aus diesen Gründen wurde in den weiteren Untersuchungen die In-Stream-Sonde nicht verwendet.

## 6.2 Aufladung nur eines Kunststoffes in der Wirbelkammer

Die Aufladung nur eines Kunststoffes in der Wirbelschicht stellt im Vergleich zu den in früheren Arbeiten meist untersuchten Zweikomponenten-Kunststoffgemischen ein wesentlich vereinfachteres System dar. Durch die Reduzierung der Komplexität der Problematik ist es eventuell möglich, einige der vielen noch offenen Fragen (siehe **Kapitel 2**) zu beantworten.

### 6.2.1 Aufladung eines einzelnen Kunststoffes in der Wirbelkammer mit artgleicher Kunststoffwand

Um die Höhe der Aufladung bei Kontakt artgleicher Kunststoffteilchen ermitteln zu können, wurde die Wandung der Wirbelkammer mit dem artgleichen Kunststoff-Granulat beschichtet. Damit ließ sich das Zu- und Abfließen von Ladungen über die Metallwand verhindern. Um gleiche Ausgangsbedingungen bei jedem Versuch zu gewährleisten, wurde die Wandung vor Versuchsbeginn mit entionisiertem Wasser gewaschen und anschließend bei einer Temperatur von  $t = 50\text{ °C}$  getrocknet. Die Aufladungsversuche erfolgten, wenn nicht anders angegeben, unter Standardbedingungen.

#### 6.2.1.1 Einfluss der Aufladungsdauer

Ausgehend von einer symmetrischen Kontaktierung artgleicher Kunststoffteilchen ist nicht zu erwarten, dass sich die Kontaktflächen der Teilchen gegenseitig triboelektrisch aufladen (s. 2.2.1). Die in den **Bildern 67 und 68** vorgestellten Ergebnisse zeigen jedoch deutlich, dass sich artgleiche Kunststoffe bei Kontakt gegeneinander aufladen können. Das gilt insbesondere für die polaren Kunststoffe. Ihre Aufladung hat dabei einen ausgeprägten bipolaren Charakter. Das zeigte sich bei den Aufladungsversuchen in der Form, dass ein Teil der aufgeladenen Kunststoffteilchen zur positiven Elektrode, der andere Teil zur negativen Elektrode ausgelenkt wurde.

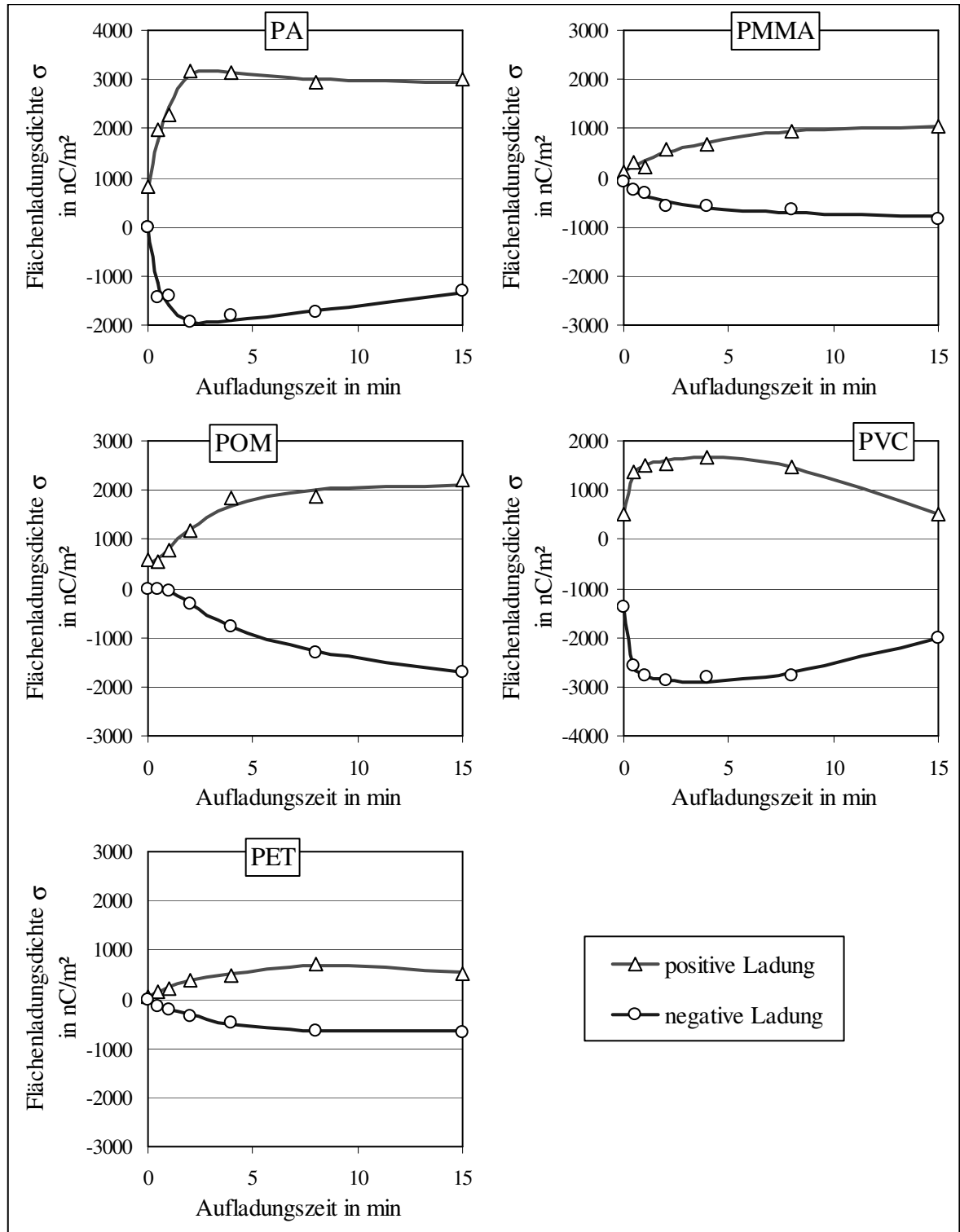


Bild 67: Aufladung von PA, PMMA, POM, PVC und PET in der Wirbelkammer mit artgleicher Kunststoffwand in Abhängigkeit von der Aufladungsdauer

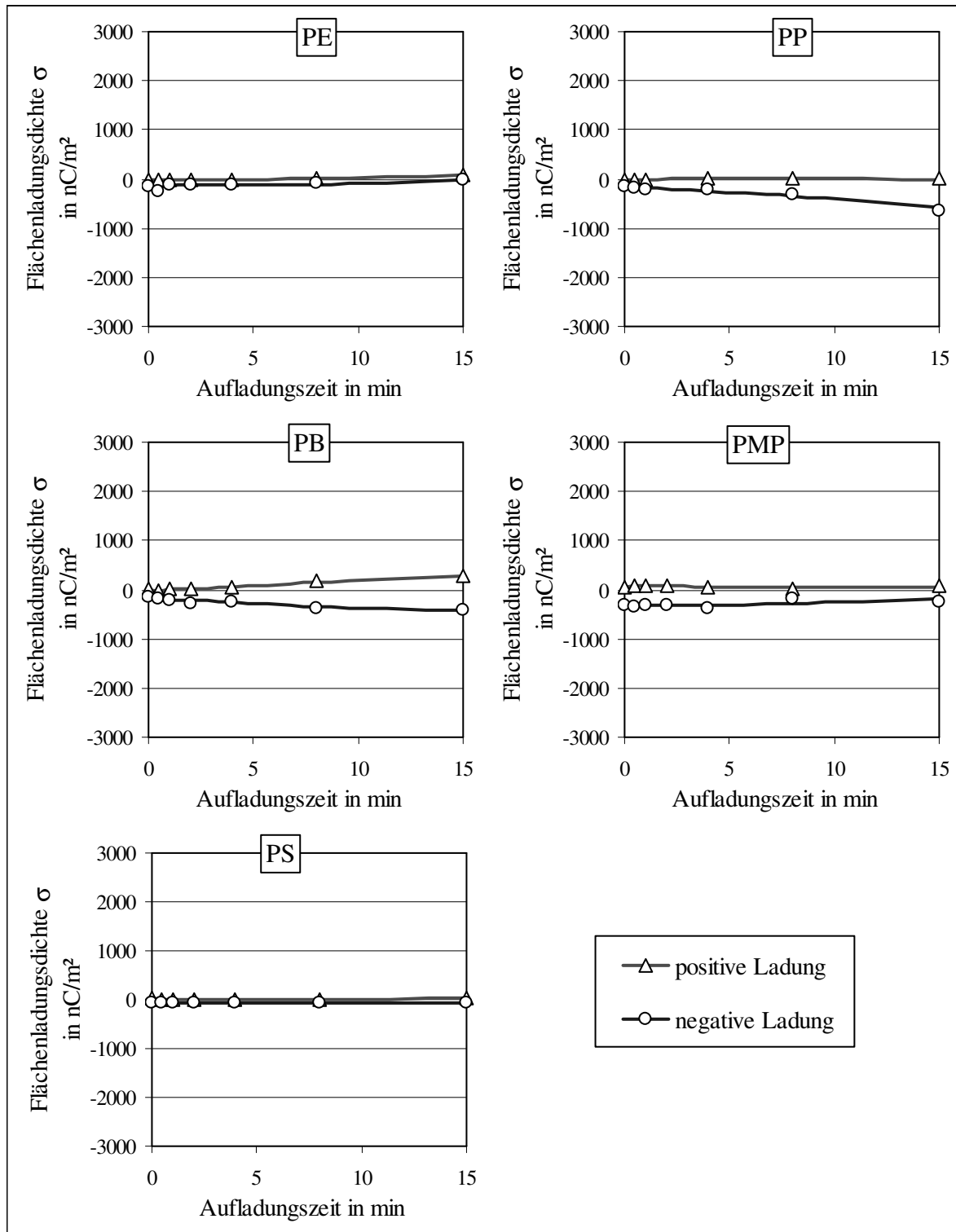


Bild 68: Aufladung von PE, PP, PB, PMP und PS in der Wirbelkammer mit artgleicher Kunststoffwand in Abhängigkeit von der Aufladungsdauer

Die maximale Aufladung der polaren Kunststoffe wurde bereits nach wenigen Minuten – ausgenommen POM – erreicht. Der folgende parallele bzw. leicht abnehmende Verlauf der Aufladungskurven weist darauf hin, dass sich in diesem Zeitraum sowohl Prozesse der Teilchenaufladung als auch -entladung vollzogen. In welchem Umfang dabei Gasentladungen zwischen Wand und Teilchen sowie den Kunststoffteilchen untereinander die Flä-

chenladungsdichte beeinflussen, kann gegenwärtig nicht beantwortet werden. Bei Aufladungszeiten von 30 bzw. 60 min verringerte sich die Flächenladungsdichte weiter. Die unpolaren Kunststoffe luden sich unter den gegebenen Kontaktierungsbedingungen nicht (PE, PS) bzw. nur geringfügig (PP, PB, PMP) auf (**Bild 68**).

Die beobachtete Bipolarität ist nicht immer symmetrisch. Die Kunststoffe PA und POM besitzen eine stark positive, PVC eine stark negative Überschussladung (**Bild 69**). Die Ursache für diese Überschussladungen ist noch nicht geklärt. Man geht davon aus, dass durch die Kunststoffbeschichtung auf der Wandung des Wirbelzylinders kein Ladungsaustausch mit der äußeren Metall-Wandung erfolgen kann. Vermutlich verbleiben die durch den Kontakt übertragenen Ladungsträger nur teilweise auf der Kunststoffoberfläche. Ein Teil könnte nach erfolgten Gasentladungen mit der Luft aus dem System ausgetragen werden. Das Ergebnis wäre eine verbleibende Überschussladung auf den Kunststoffteilchen.

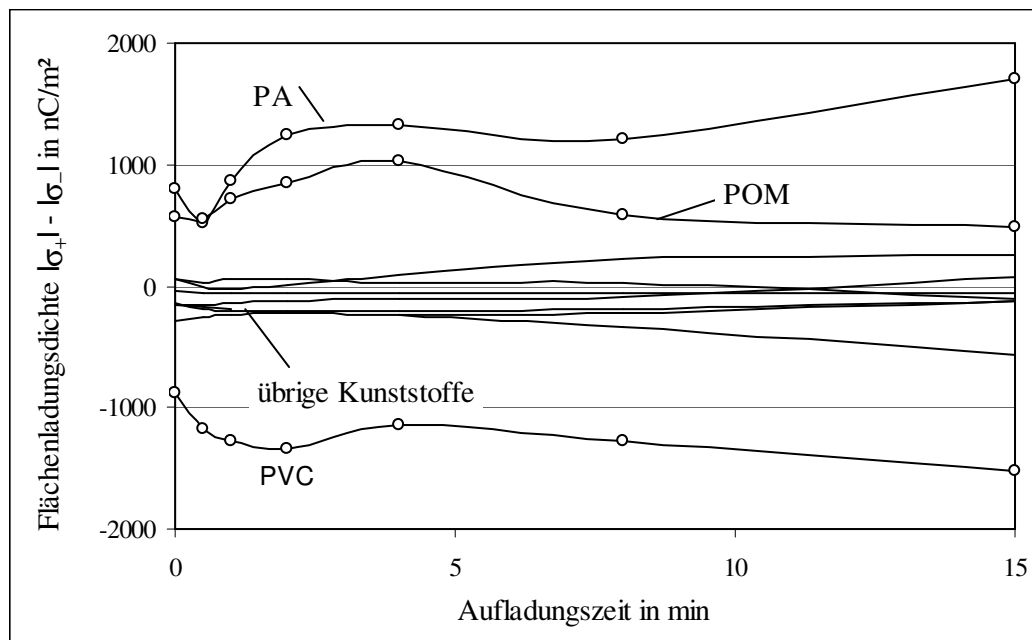


Bild 69: Im Überschuss vorhandene Flächenladungsdichte bei Aufladung von Kunststoffen gleicher Art

Als wichtige Frage war zu klären, wie die bipolare Aufladung polarer Kunststoffe in der Wirbelschicht entsteht. Bei bipolarer Aufladung eines Zweikomponenten-Gemisches laden sich bekanntlich die Komponenten, bedingt durch ihre stoffspezifischen Eigenschaften, vorzugsweise positiv oder negativ auf. Während des anschließenden Trennprozesses im elektrostatischen Freifallscheider werden die Teilchen entsprechend ihrer Ladung zur negativen bzw. positiven Elektrode ausgelenkt (s. Masseverteilung in **Bild 70a**). Im Gegensatz zu diesem Trennverhalten zeigte die Masseverteilung einer Einkomponenten-Kunststoffprobe eine nahezu Gauß'sche-Verteilung mit geringerer mittlerer Auslenkung (**Bild 70b**). Ein Teil der Kunststoff-Teilchen hatte eine positive, ein Teil eine negative Ladung. Wurden nach einem abgeschlossenen Versuch nur die positiv oder negativ aufgeladenen Teilchen erneut aufgeladen, so entstand wieder eine bipolare Aufladung der



Kunststoffteilchen. Die Ursache der Bipolarität ist folglich nicht in der Inhomogenität der Teilchen zu suchen.

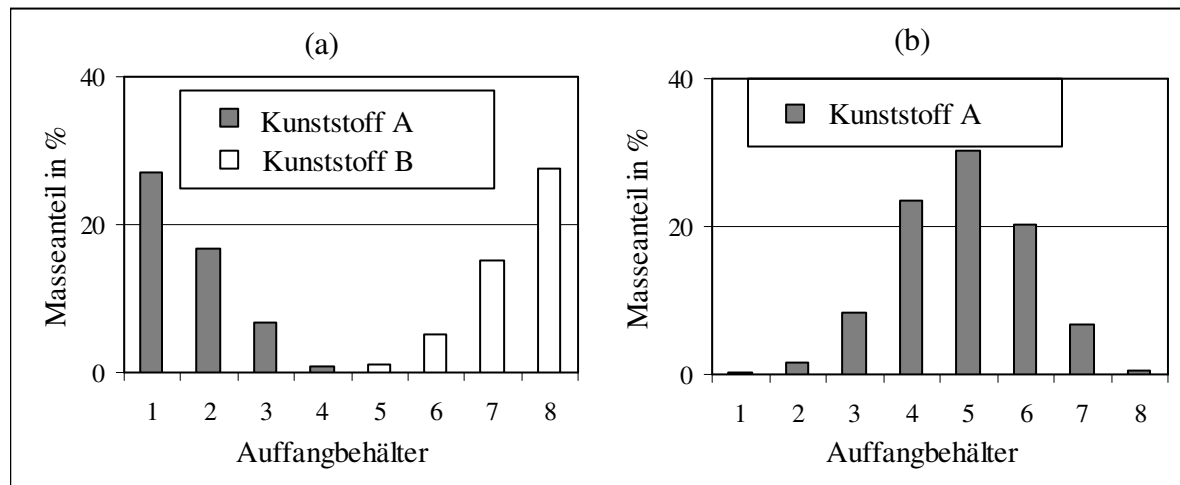


Bild 70: Typische Masseverteilung eines Zweikomponenten-Gemisches (a) und einer Einkomponenten-Kunststoffprobe (b) in den Auffangbehältern des Freifallscheiders nach Aufladung und anschließender Trennung

Über die gegenseitige Aufladung artgleicher Kunststoffe wurde in der Literatur bisher nur sehr wenig diskutiert, ist jedoch ein nicht unbekanntes Phänomen. Als Ursache hierfür wird eine asymmetrische Kontaktierung der Oberflächen angegeben. Diese soll einen Ladungstransport entweder aufgrund der entstehenden Temperaturdifferenzen bewirken [61, 62] oder weil sich die Oberflächenzustände nicht im Gleichgewichtszustand befinden (s. 2.2.1).

Eine asymmetrische Kontaktierung der Teilchen in der Wirbelkammer kann auch bei den eigenen Versuchen nicht ausgeschlossen werden. Ihre Wahrscheinlichkeit wird jedoch besonders im Fall der nahezu kugelförmigen Kunststoffteilchen als gering eingeschätzt.

Aus der Literatur ist bekannt, dass die Ladungen auf der Kunststoffoberfläche nach einer Triboaufladung nicht homogen verteilt sind. Auf der Oberfläche liegen sowohl positiv als auch negativ aufgeladene Bereiche direkt nebeneinander vor. Diese bestimmen die dominierende Netto-Aufladung des Kunststoffteilchens [10, 61, 140]. Auch am Institut für Polymerforschung Dresden gelang es, auf einer aus PS hergestellten Folie mittels Electric Force Microscopy im Modus Surface Potential Imaging über die gesamte Oberfläche unabhängig von der Topographie zeitlich stabile positive und negative Ladungsdomänen nachzuweisen (s. 4.4).

Die Experimente zur Aufklärung der örtlich unterschiedlichen triboelektrischen Aufladung (place-to-place fluctuation) an einer Kunststoffoberfläche führte in [113] zur Feststellung, dass die Kunststoffeigenschaften an der Oberfläche nicht einheitlich sind. Dies wurde auch in [153] bestätigt und angenommen, dass eine Kunststoffoberfläche sowohl Donator- als auch Akzeptor-Zustände haben muss.

Bei der Erarbeitung einer **Modellvorstellung** zur triboelektrischen Aufladung artgleicher Kunststoffe ist somit davon auszugehen, dass an der Oberfläche eines Polymers direkt nebeneinander positiv und negativ aufladbare Bereiche (Domänen) vorliegen. Diese Bereiche haben somit vorzugsweise Elektronen-Akzeptor- bzw. Elektronen-Donator-Eigen-

schaften. Sie können mit den Lewis-Säure/Base-Parametern  $\alpha$  und  $\beta$  charakterisiert werden. **Bild 71** zeigt eine schematische Darstellung dieser Bereiche auf der Kunststoffoberfläche.

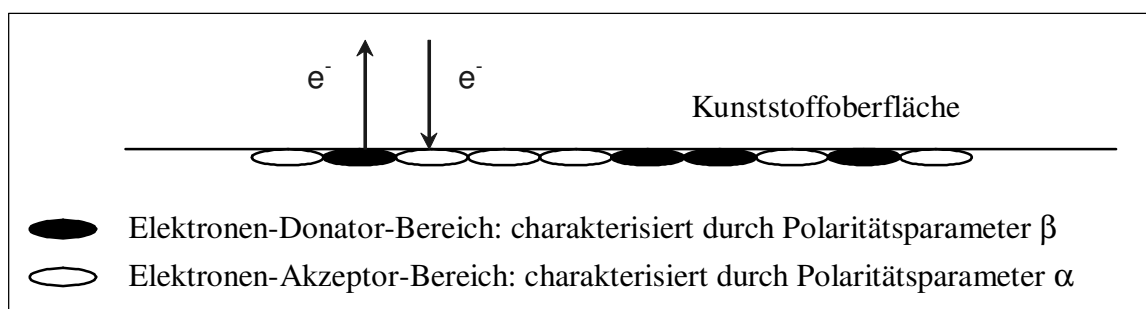


Bild 71: Modellvorstellung zur Verteilung der Elektronen-Akzeptor/Donator-Bereiche auf der Kunststoffoberfläche

Die Ursache für die Entstehung der Domänen ist noch nicht geklärt. Es wird vermutet, dass dabei das adsorbierte Wasser eine entscheidende Rolle spielt. An der Oberfläche von Halit wurde beobachtet, dass es zu einer Inselbildung infolge des adsorbierten Wassers kommt bzw. sich die Wasseradsorption auf die Ionenmobilität auswirkt [154].

Betrachtet man die EFM-Aufnahme des PS (s. 4.4, **Bild 42**) kann man die Größe der Domänen auf einige 10 bis 100  $\mu\text{m}$  schätzen.

Der in **Bild 72** dargestellte Zusammenhang zwischen den Elektronen-Akzeptor/Donator-Eigenschaften der Kunststoffoberfläche und den während der Aufladungsversuche erzeugten Flächenladungsdichten ( $t_A = 4 \text{ min}$ ) zeigt deutlich, dass der Polaritätsparameter  $\beta$  die Flächenladungsdichte  $\sigma_+$  und der Polaritätsparameter  $\alpha$  die Flächenladungsdichte  $\sigma_-$  bestimmt. Diese Korrelation konnte auch für die anderen Aufladungszeiten festgestellt werden.

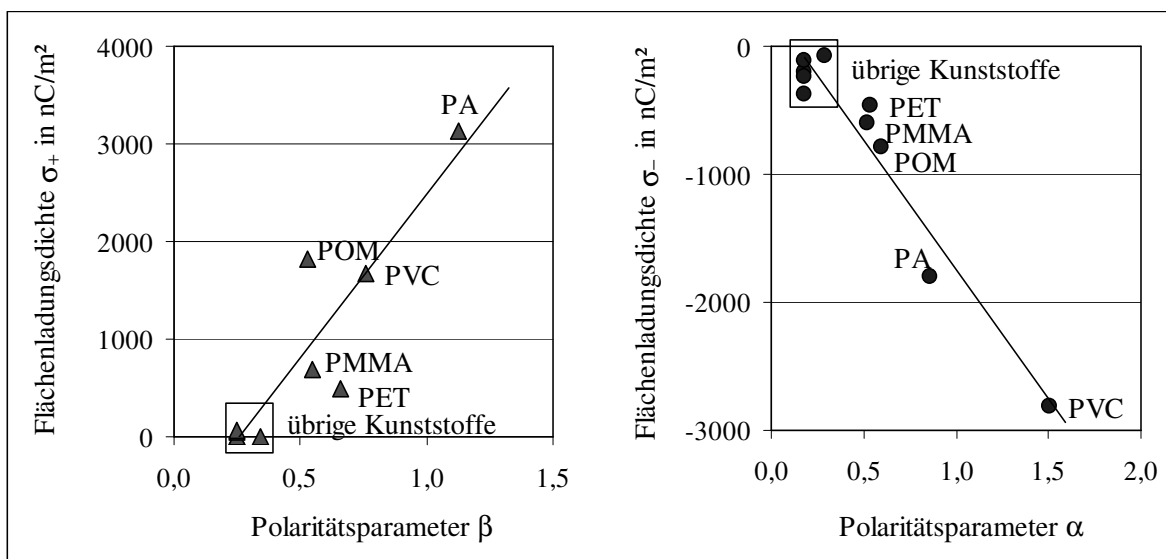


Bild 72: Korrelation zwischen dem Aufladungsverhalten der Kunststoffe in der Wirbelkammer mit artgleicher Kunststoffwand und der Elektronen-Akzeptor/Donator-Eigenschaften der Kunststoffoberfläche  
Aufladungszeit:  $t_A = 4 \text{ min}$

Ermittelt man die Aufladungsgeschwindigkeit  $w_Q$  aus den Kurvenverläufen der **Bilder 67** und **68** für die Flächenladungsdichten  $\sigma_+$  und  $\sigma_-$  nach

$$w_Q = \frac{|\sigma_{\max,90}|}{t_{90}} \quad (23)$$

$\sigma_{\max,90}$  90 %-Wert der maximalen Flächenladungsdichte

$t_{90}$  Aufladungszeit bei Erreichen des 90 %-Wertes von  $\sigma_{\max}$

und bringt sie in Beziehung mit den Lewis-Säure/Base-Polaritätsparametern  $\alpha$  und  $\beta$ , so ergibt sich ebenfalls ein deutlicher Zusammenhang. Mit steigendem Polaritätsparameter  $\alpha$  bzw.  $\beta$  nimmt die Aufladungsgeschwindigkeit exponentiell zu (**Bild 73**).

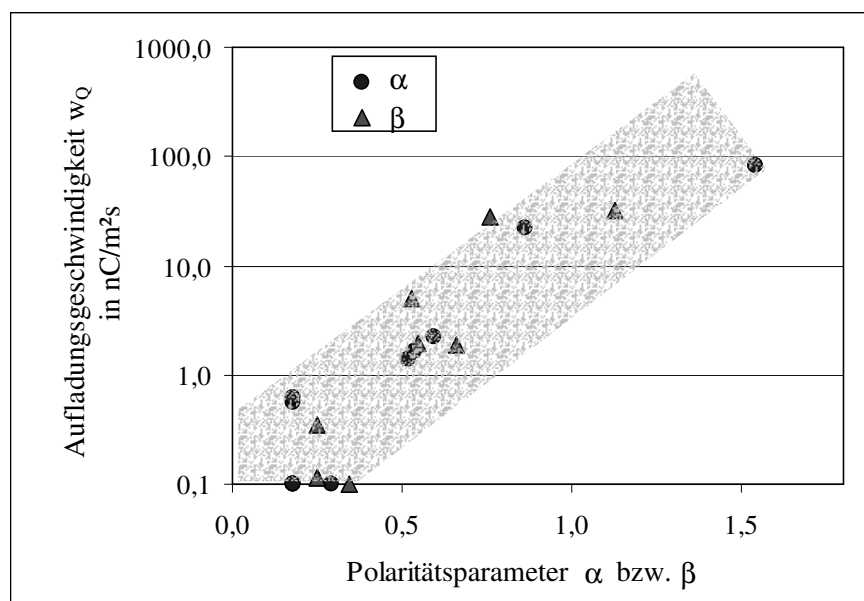


Bild 73: Zusammenhang zwischen den Lewis-Säure/Base-Eigenschaften der Kunststoffe und ihrer Aufladungsgeschwindigkeit

Nach der Modellvorstellung können sich zwei Kunststoffteilchen bei einem Kontakt aufladen, wenn ein Akzeptor-Bereich des einen Teilchens den Donator-Bereich des anderen Teilchens kontaktiert (**Bild 74**).

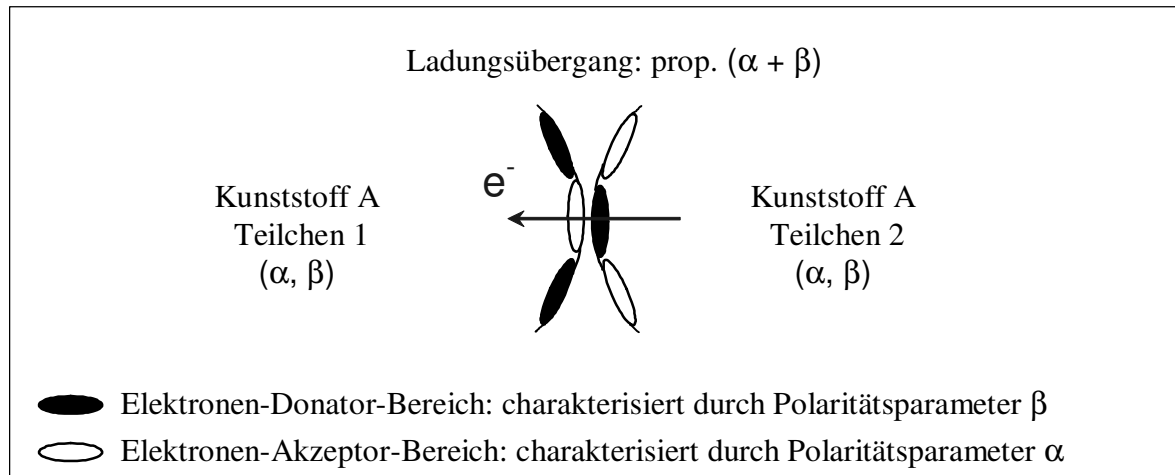


Bild 74: Modellvorstellung zur triboelektrischen Aufladung artgleicher Kunststoffe

Die übergegangene Ladung ist bei einem Kontakt proportional zur Elektronen-Donator- bzw. -Akzeptor-Stärke der Kontaktflächen. Dies wird mit dem Polaritätsparameter  $(\alpha + \beta)$  ausgedrückt.

Trägt man die ermittelte Flächenladungsdichte gegen die Polaritätsparameter  $(\alpha + \beta)$  des Kunststoffes auf, ergibt sich **Bild 75**. Hierdurch wird die Modellvorstellung bestätigt.

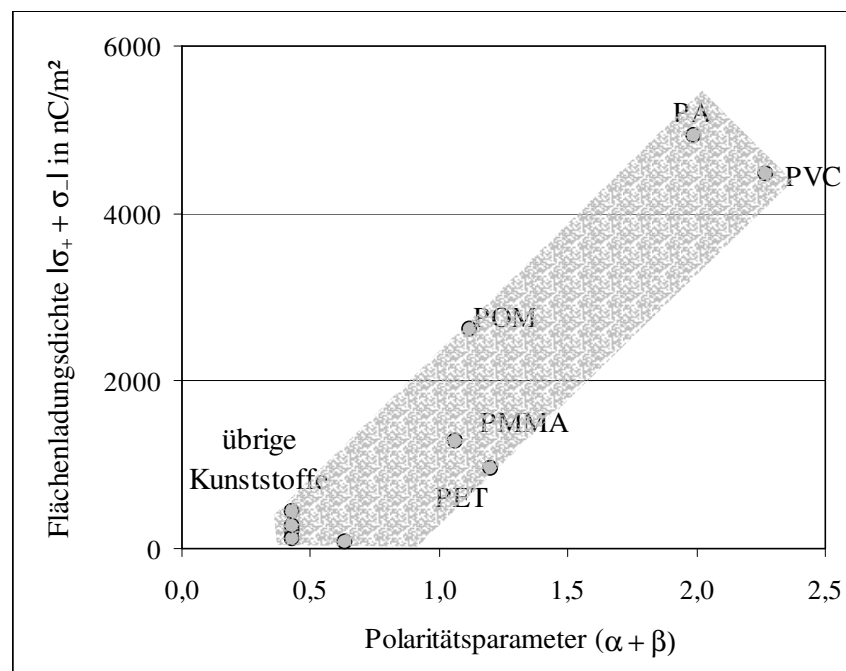


Bild 75: Aufladung artgleicher Kunststoffe in Abhängigkeit von ihren Polaritätsparametern  $(\alpha + \beta)$

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Lewis-Säure/Base-Polaritätsparameter  $\alpha$  und  $\beta$  sowohl die Ladungshöhe als auch die Kinetik der Aufladung bei artgleichen Kunststoffen bestimmen.

### 6.2.1.2 Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit

Den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Aufladung zeigt **Bild 76**. Dabei wird ein sehr dif-

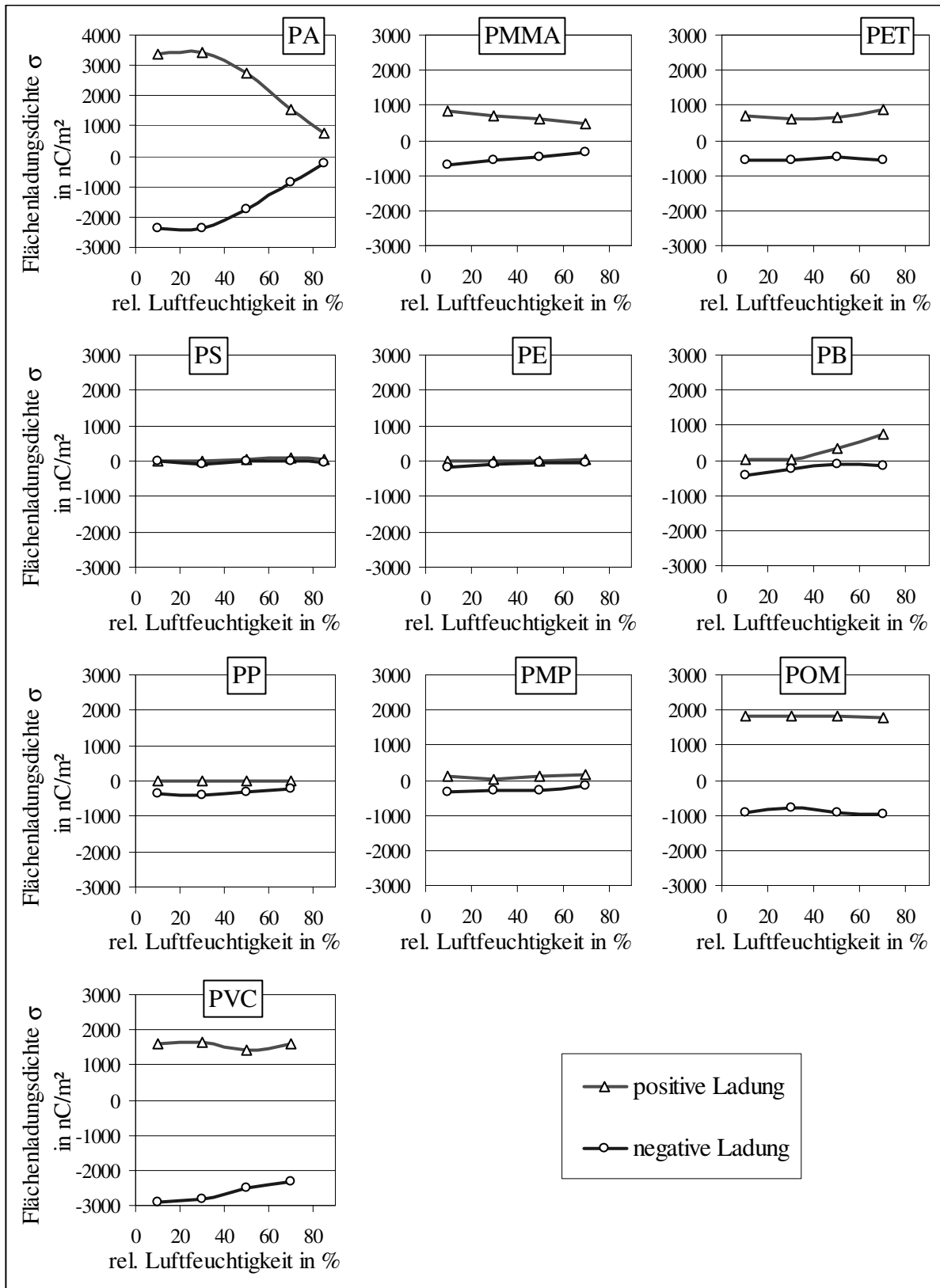


Bild 76: Aufladung artgleicher Kunststoffe in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit

ferenziertes Verhalten deutlich. Bei PA ergibt sich eine starke Abnahme der Flächenladungsdichte mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit. Diese Tendenz ist bei PMMA und PVC weniger ausgeprägt. Bei den schwach polaren Kunststoffen ändert sich die Ladungshöhe nicht oder nur geringfügig. Als Ursache für das unterschiedliche Verhalten wird gesehen, dass sich in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit auf einigen Kunststoffoberflächen wasserhaltige Quellschichten ausbilden. PA, PMMA und POM besitzen ein außerordentlich hohes Wasseraufnahmevermögen (s. 4.2). Des Weiteren treten bei diesen Kunststoffen ausgeprägte Hysteresen zwischen den Gleichgewichts-Wasserdampfadsorptions- und Wasserdampfdesorptionsisothermen auf. Dieses Verhalten bestätigt die Ausbildung von Quellschichten im Oberflächenbereich der Kunststoffe. Das Wasseraufnahmevermögen der Polyolefine war dagegen gering. POM bildete eine Ausnahme, da die Aufladung trotz hoher Wasseraufnahme keine Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit zeigte.

Aus der Literatur sind keine vergleichbaren Ergebnisse zur Aufladung artgleicher Kunststoffe in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit bekannt.

Von besonderem Interesse ist auch, dass zwischen dem Aufladungsverhalten und dem spezifischen Oberflächenwiderstand ein Zusammenhang besteht (**Bild 77**).

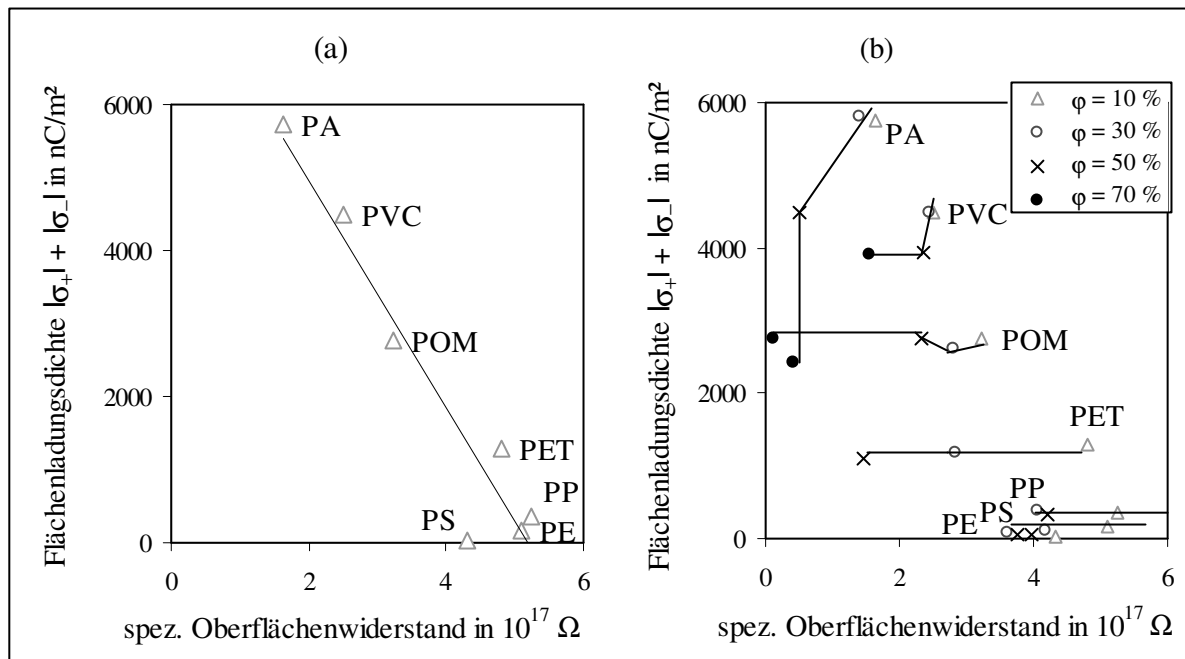


Bild 77: Zusammenhang zwischen dem spezifischen Oberflächenwiderstand und der insgesamt entstandenen Flächenladungsdichte  $|\sigma_+| + |\sigma_-|$  bei Aufladung artgleicher Kunststoffe

(a) bei einer Luftfeuchtigkeit von  $\phi = 10\%$ ;

(b) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit

Bei geringen relativen Luftfeuchtigkeiten ( $\phi \leq 30\%$ ) laden sich diejenigen Kunststoffe stärker triboelektrisch auf, die einen geringen spezifischen Oberflächenwiderstand besitzen. Die Polyolefine, die einen außerordentlich hohen Oberflächenwiderstand aufweisen, laden sich nicht oder nur geringfügig auf. Es zeigt sich also, dass eine höhere Leitfähigkeit

der Kunststoffoberfläche in Verbindung mit einer niedrigeren relativen Luftfeuchtigkeit die triboelektrische Aufladung begünstigt. Andererseits kann es bei hohen Leitfähigkeiten infolge hoher relativer Luftfeuchtigkeiten zu einem beträchtlichen Ladungsrückfluss nach einer Kontaktierung zwischen zwei Teilchen kommen (siehe **Bild 77b**; insbesondere bei PA). Das führt dazu, dass die Kontaktpartner nach der Trennung ggf. nur noch geringe Restladungen besitzen. Die gemessene Ladung ist schließlich das Ergebnis von Auf- und Entladungsvorgängen.

Anhand der Ergebnisse stellt sich die Frage, ob zwischen dem spezifischen Oberflächenwiderstand und den Lewis-Säure/Base-Parametern der Kunststoffe eine Korrelation besteht. Der entsprechende Zusammenhang ist in **Bild 78** dargestellt. Kunststoffoberflächen, die einen höheren Polaritätsparameter besitzen, haben auch einen geringeren Oberflächenwiderstand. Hierfür kann man mittels des Hopping-Modells eine Erklärung formulieren.

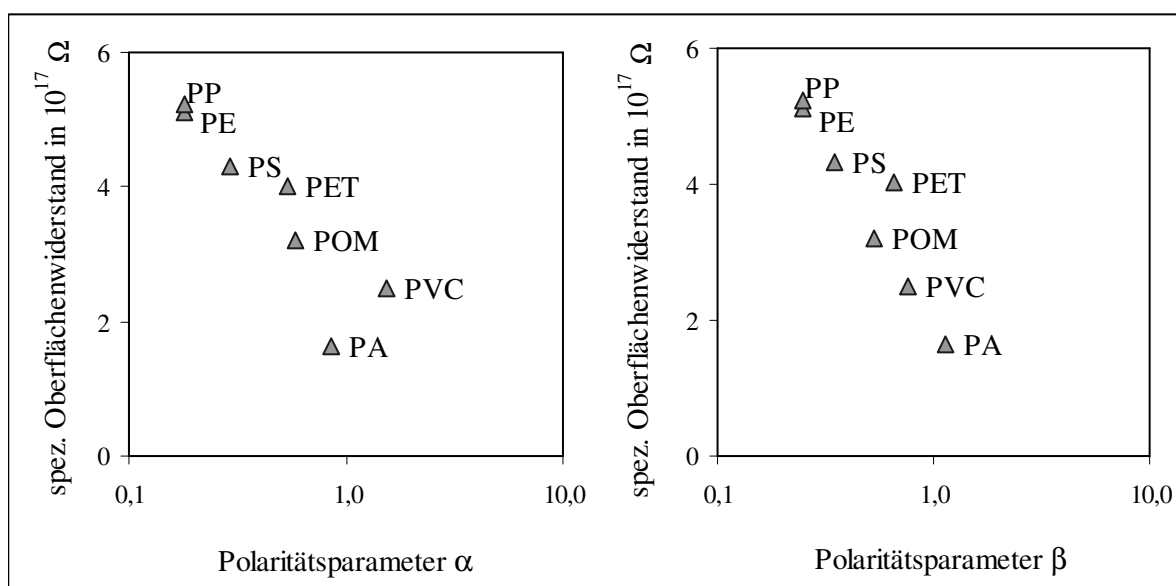


Bild 78: Korrelation zwischen den Lewis-Säure/Base-Eigenschaften und dem spezifischen Oberflächenwiderstand der Kunststoffe

Relative Luftfeuchtigkeit:  $\phi = 10 \%$

Das Hopping-Modell [135, 155] besagt, dass zwischen den Valenz- und Leitungsbändern Energieniveaus existieren, die als Elektronen-Haftstellen fungieren. Es ist denkbar, dass sich Ladungsträger auf Grund der Wirkung eines äußeren elektrischen Feldes durch Sprünge (Hopping) zwischen den Haftstellen in einer Vorzugsrichtung bewegen. Ein polarer Kunststoff mit ausgeprägt starken Lewis-Säure/Base-Parametern ist im Oberflächenbereich energetisch unebener als ein unpolarer. Er kann also mehr Energieniveaus (Haftstellen) besitzen, die den Hopping-Prozess begünstigen und dadurch eine höhere elektrische Leitfähigkeit in der Oberflächenschicht hervorrufen.

## 6.2.2 Aufladung eines einzelnen Kunststoffes in der Wirbelkammer mit Metallwand

Die Aufladung eines einzelnen Kunststoffes in einer Wirbelkammer mit Metallwandung beruht auf der Kontaktierung der Kunststoffteilchen untereinander sowie auf Kontakten der Kunststoffteilchen mit der Metallwand. Aus der sich ergebenden Aufladung kann deshalb nur qualitativ auf den Beitrag der Kunststoff-Metall-Stöße an der Gesamtaufladung geschlossen werden.

### 6.2.2.1 Einfluss der Aufladungsdauer

Für die Untersuchungen zum Einfluss der Aufladungsdauer wurden die Kunststoffe in einer Wirbelkammer mit goldbeschichteter Wandung bei unterschiedlicher Zeitdauer aufgeladen. Das Aufladungsverhalten zeigen die **Bilder 79 und 80**. Es ist erkennbar, dass bei allen Kunststoffen – ausgenommen POM – nach wenigen Minuten eine maximale Aufladung erreicht wurde. Bei POM war auch nach  $t_A = 15$  min der Aufladungsvorgang noch nicht abgeschlossen.

Die maximalen Flächenladungsdichten der unpolaren bzw. wenig polaren Kunststoffe PE, PP, PMP, PB und PS lagen in der Größenordnung von  $\sigma = -1500 \text{ nC/m}^2$  (**Bild 80**), was mit den Ergebnissen in [14] und [139] gut übereinstimmt. Die Entstehung der negativen Aufladung des PE gegen Metall wird in [139] mit der Differenz der Elektronenaustrittsarbeiten erklärt. Dass sich die Kunststoffe PP, PE, PS und PVC bei einem Metallkontakt negativ aufladen, ist auch aus der Triboelektrischen Reihe nach *Brück* [67] erkennbar (s. **2.3**).

Bei den meisten untersuchten Kunststoffen kann man eine geringe bipolare Aufladung feststellen. Das heißt, dass neben der überwiegend negativen Ladung der Teilchen auch wenige positiv geladene Teilchen entstehen. Da man z. B. bei der Aufladung von PS in der Wirbelkammer mit artgleicher Kunststoffbeschichtung gar keine Aufladung messen konnte, muss die bipolare Aufladung durch die metallische Wirbelkammerwand hervorgerufen worden sein. Das Phänomen ist auch in der Literatur beschrieben [136]. Man erklärt es mit dem Vorhandensein von positiv und negativ aufgeladenen Bereichen an der Kunststoffoberfläche, wobei die negative Ladungspolarität meist überwiegt. In [56] wurden bei der Untersuchung der Aufladung an verschiedenen Kunststoffoberflächen gegen Metall bei wiederholter Kontaktierung an unterschiedlichen Stellen meist beide Ladungspolaritäten gemessen, was man mit der örtlichen Variation der Oberflächeneigenschaften der Kunststoffe begründete. Damit kann die festgestellte Bipolarität adäquat interpretiert werden.



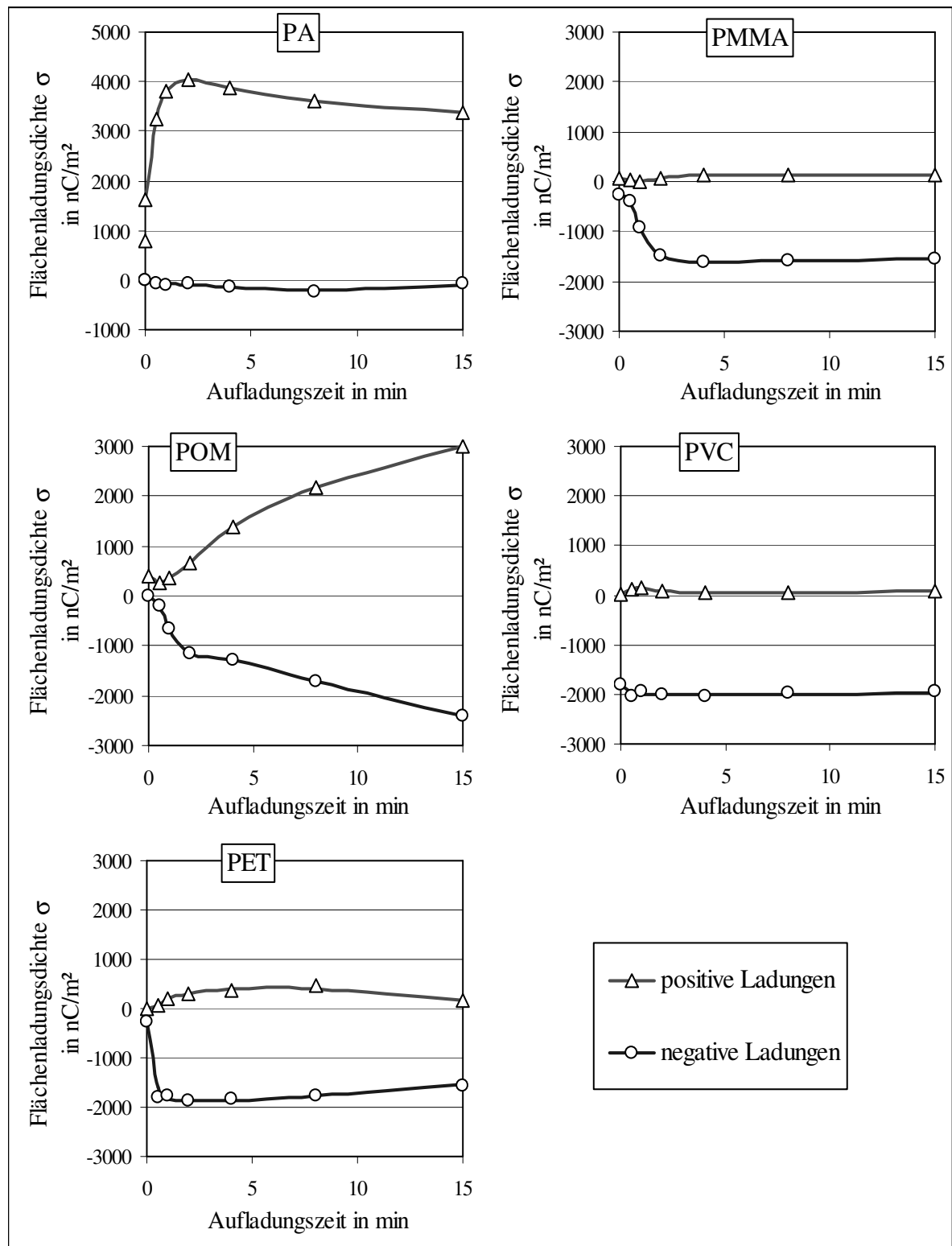


Bild 79: Aufladung von PA, PMMA, POM, PVC und PET in der Wirbelkammer mit goldbeschichteter Wand in Abhängigkeit von der Aufladungsdauer

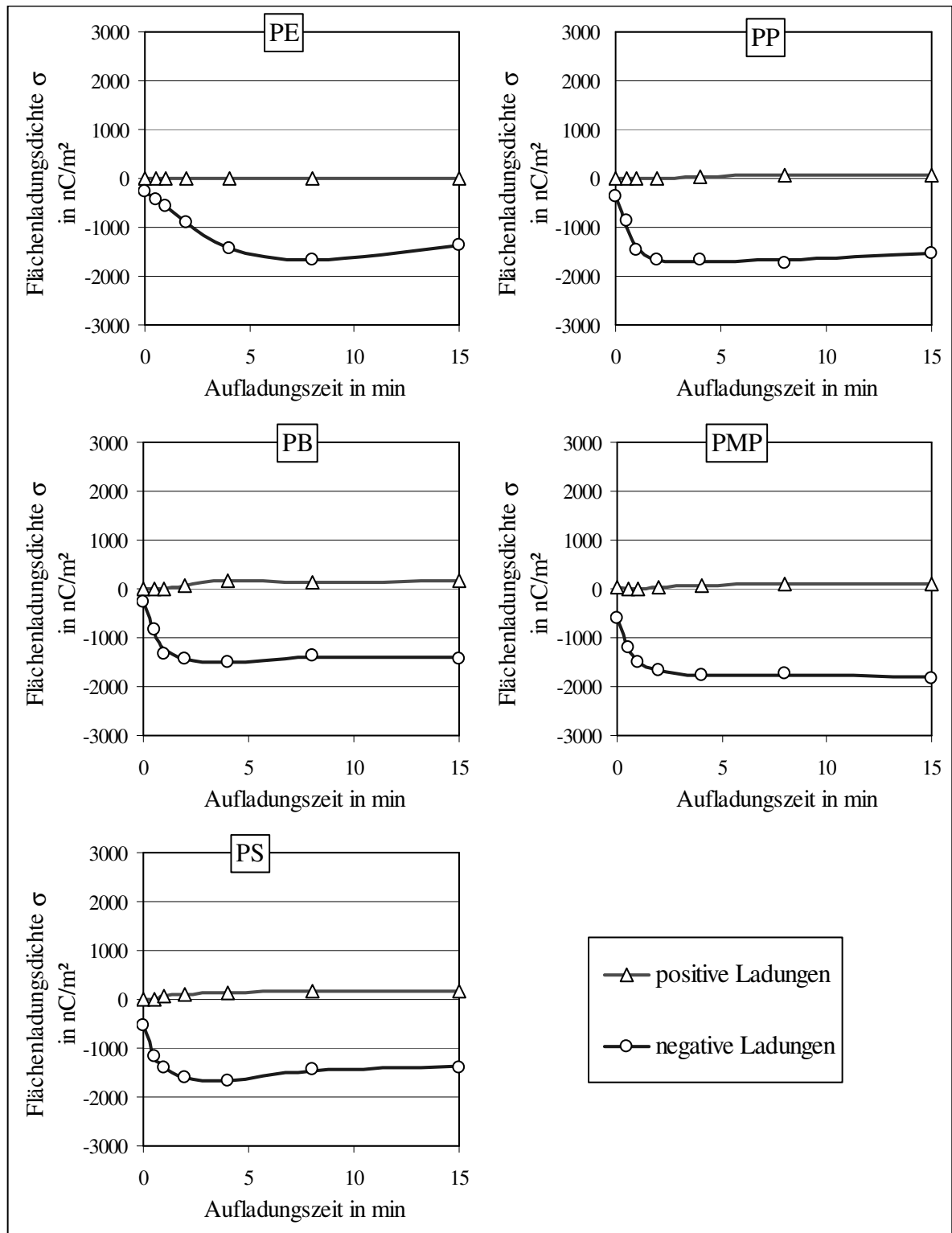


Bild 80: Aufladung von PE, PP, PB, PMP und PS in der Wirbelkammer mit goldbeschichteter Wand in Abhängigkeit von der Aufladungsdauer

Zwischen den Kunststoffen ergaben sich deutliche Unterschiede auch hinsichtlich der im Überschuss vorhandenen Flächenladungsdichte (**Bild 81b**). Während PA eine stark positive Überschussladung aufwies, erhielten fast alle übrigen untersuchten Kunststoffe eine stark negative Überschussladung, die bei PVC am stärksten war.

Das Aufladungsverhalten von POM erwies sich als besonders interessant. Auf dessen Oberfläche herrschten weitgehend ausgeglichene Ladungsverhältnisse und es entstand, ähnlich wie bei der Aufladung in der Wirbelkammer mit artgleicher Kunststoffbeschichtung, eine nahezu symmetrische bipolare Aufladung.

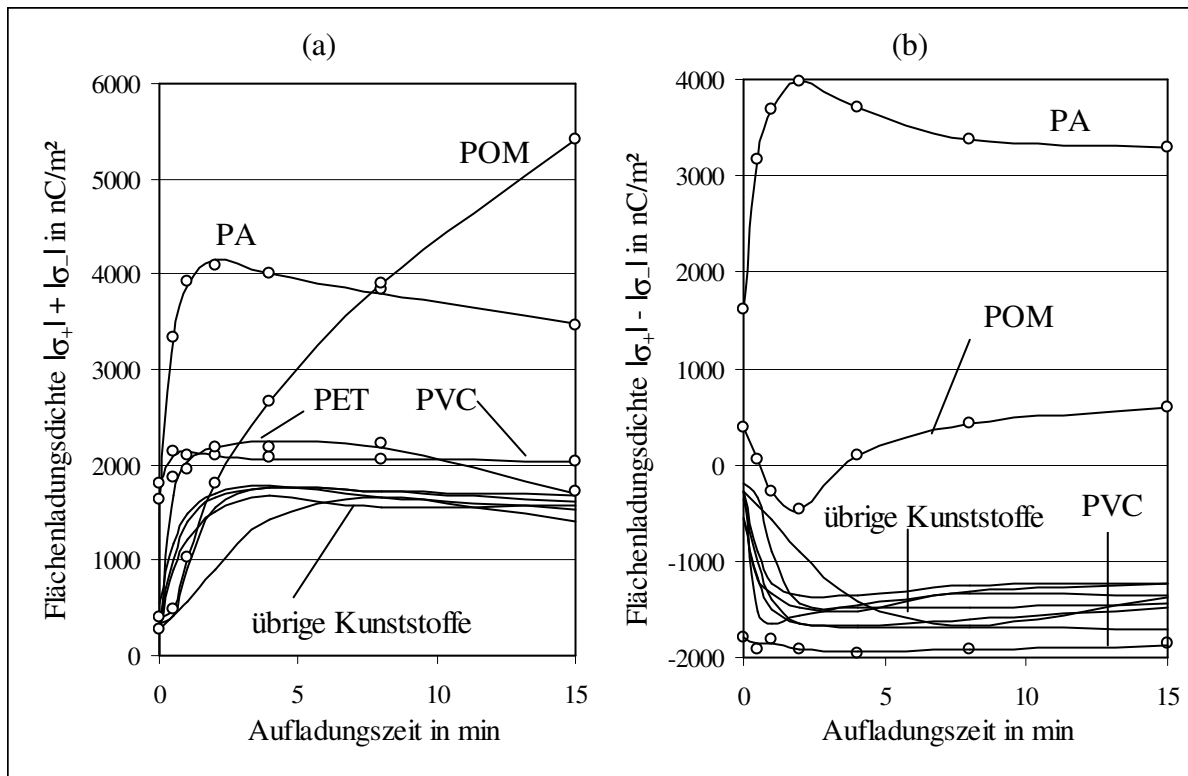


Bild 81: Insgesamt entstandene (a) und im Überschuss vorhandene Flächenladungsdichte (b) in Abhängigkeit von der Aufladungsdauer

Man kann davon ausgehen, dass das Aufladungsverhalten der Kunststoffe in einer Wirbelkammer mit Metallwand auch von den Lewis-Säure/Base-Eigenschaften der Kunststoffoberfläche bestimmt wird. Um das nachzuweisen, wurde der Anstieg der Kinetikkurven betrachtet. Ein direkter Vergleich von Ladungshöhe und Polaritätsparameter erwies sich als ungünstig, da sich bei PVC der Gleichgewichtszustand, der zudem mit starken Gasentladungen verbunden war, außerordentlich schnell einstellte.

Ermittelt man aus den Kurvenverläufen in **Bild 81a** die Aufladungsgeschwindigkeiten  $w_Q$  nach Gl. (23) und bringt diese in Zusammenhang mit den Polaritätsparametern  $\alpha$  und  $\beta$ , so ergibt sich eine deutliche Korrelation (**Bild 82**).

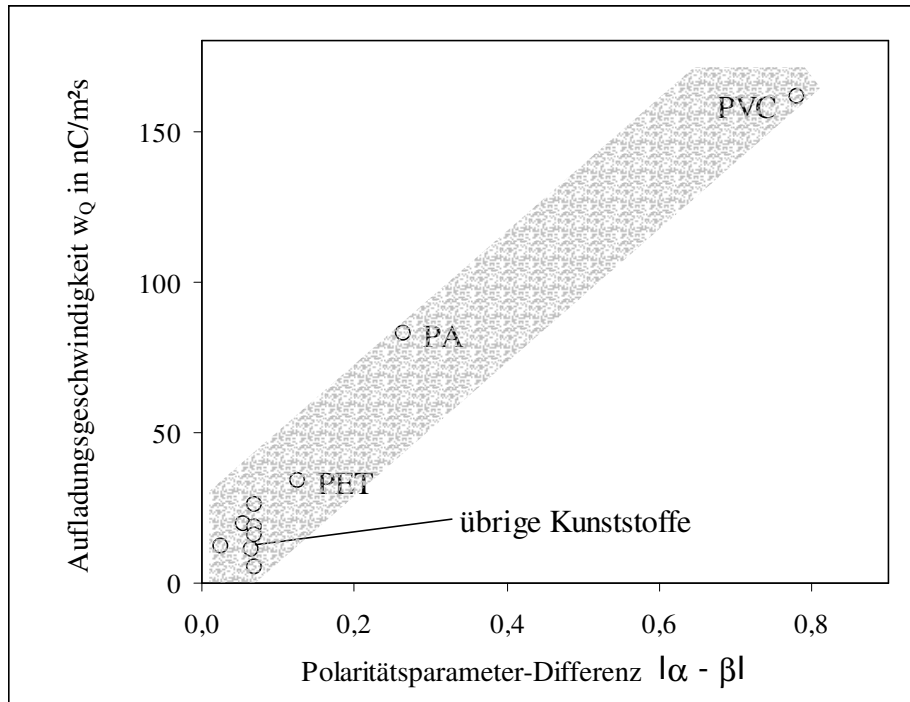


Bild 82: Zusammenhang zwischen den Lewis-Säure/Base-Eigenschaften der Kunststoffe und der Aufladungsgeschwindigkeit bei Kunststoff/Metall-Kontaktierung

Diese lässt sich wie folgt erklären: Bei der Kunststoff/Metall-Aufladung kontaktieren die Elektronen-Akzeptor- bzw. Elektronen-Donator-Bereiche der Kunststoffoberfläche die geerdete Metallwand der Wirbelkammer. Dabei werden von dem Kunststoff Elektronen an die Metallwand abgegeben (bei Metallwand/Donator-Bereich-Kontakten) bzw. aufgenommen (bei Metallwand/Akzeptor-Bereich-Kontakten). Dieser Vorgang wird in **Bild 83** verdeutlicht. Nach einer bestimmten Zeit wird die Aufladung der Kunststoffoberfläche durch die Summe der aufgenommenen und abgegebenen Ladungsträger bestimmt. Diese hängt von der Differenz der Lewis-Säure/Base-Polaritätsparameter ab. Mit steigender Differenz der Polaritätsparameter nimmt die Aufladungsgeschwindigkeit linear zu. Daraus folgt die geringe Aufladungsgeschwindigkeit der unpolaren Kunststoffe.

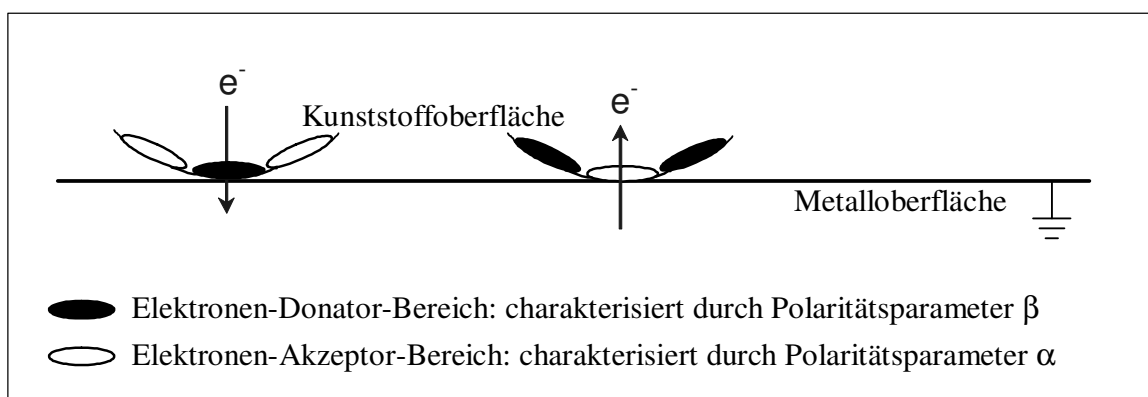


Bild 83: Modellvorstellung zum Ladungsübergang bei Kunststoff/Metall-Kontaktierung

Vergleicht man die im Überschuss vorhandenen Ladungen  $|\sigma_+| - |\sigma_-|$  mit der Polaritätsparameter-Differenz, so erhält man den in **Bild 84** dargestellten Zusammenhang. Stark polare Kunststoffe, wie PA und PVC, erhalten bei einem Kontakt gegen Metall eine Überschussladung entsprechend ihrer Lewis-Säure/Base-Eigenschaften. PA erfährt einen ausgeprägt positiven, PVC einen negativen Ladungsüberschuss. Unpolare bzw. nur gering polare Kunststoffe besitzen eine einheitliche Überschussladung von ca. -1500 nC/m<sup>2</sup>.

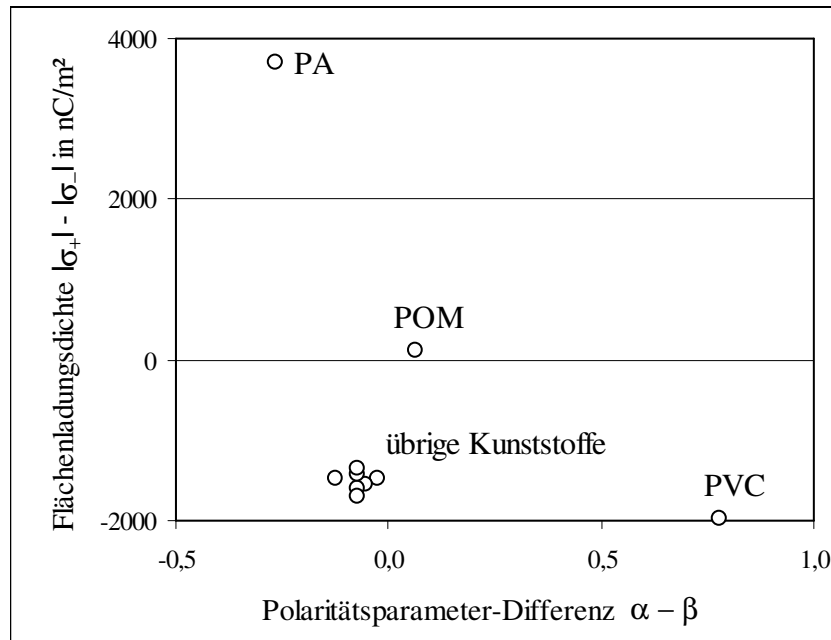


Bild 84: Zusammenhang zwischen den Lewis-Säure/Base-Eigenschaften und den im Überschuss vorhandenen Ladungen bei Kunststoff/Metall-Kontaktierung

Vergleicht man die Aufladung der Kunststoffe, die in einer Wirbelkammer mit Metallwandung bzw. einer Kunststoff-Wandung erreicht werden kann, unter Einbeziehung des spezifischen Oberflächenwiderstandes, so sind deutliche Unterschiede erkennbar (**Bild 85**). Bei den stark polaren Kunststoffen (PA, PVC) verringert sich mit dem Übergang von der Kunststoff- zur Metallwandung die insgesamt entstandene Flächenladungsdichte. Demgegenüber konnte bei den unpolaren Kunststoffen eine deutliche Zunahme festgestellt werden. Auf die Aufladung von POM hat die Metallwand scheinbar nur eine geringe Wirkung. Die erreichte Ladungshöhe und die Bipolarität der Aufladung bleiben unbeeinflusst. Offensichtlich unterscheidet sich der Aufladungsmechanismus des POM von dem der anderen Kunststoffe.

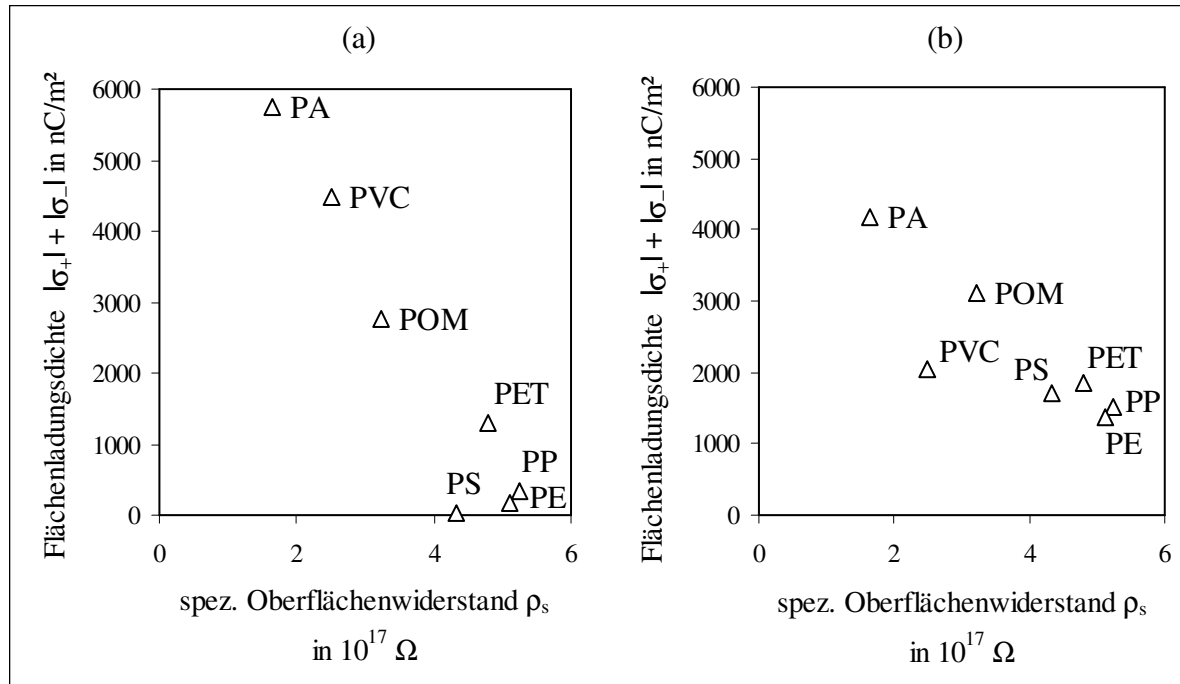


Bild 85: Zusammenhang zwischen dem spezifischen Oberflächenwiderstand der Kunststoffe und der insgesamt entstandenen Flächenladungsdichte  
a) mit artgleichem Kunststoff belegte Wand; b) mit goldbeschichteter Wand  
Relative Luftfeuchtigkeit:  $\varphi = 10 \%$

**Bild 85** bekräftigt auch den bereits bei artgleicher Kunststoff-Kontaktierung festgestellten Zusammenhang, dass bei niedriger relativer Luftfeuchtigkeit mit Verringerung des spezifischen Oberflächenwiderstandes die Flächenladungsdichte steigt.

#### 6.2.2.2 Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit

**Bild 86** zeigt den Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Aufladung von Kunststoffen bei Kunststoff/Metall-Kontaktierung.

Die Abhängigkeiten sind nicht so stark ausgeprägt wie bei artgleicher Kunststoffkontaktierung. Eine deutliche Verringerung der Flächenladungsdichte ist für PA und POM bei  $\varphi = 70 \%$  zu beobachten. Die Ursache dafür ist im hohen Wasseraufnahmevermögen und in der Ausbildung einer Quellschicht an der Oberfläche dieser Kunststoffe zu suchen. Eine abnehmende Tendenz der Aufladung mit steigender Luftfeuchtigkeit ist auch bei PVC, allerdings weniger ausgeprägt, festzustellen.

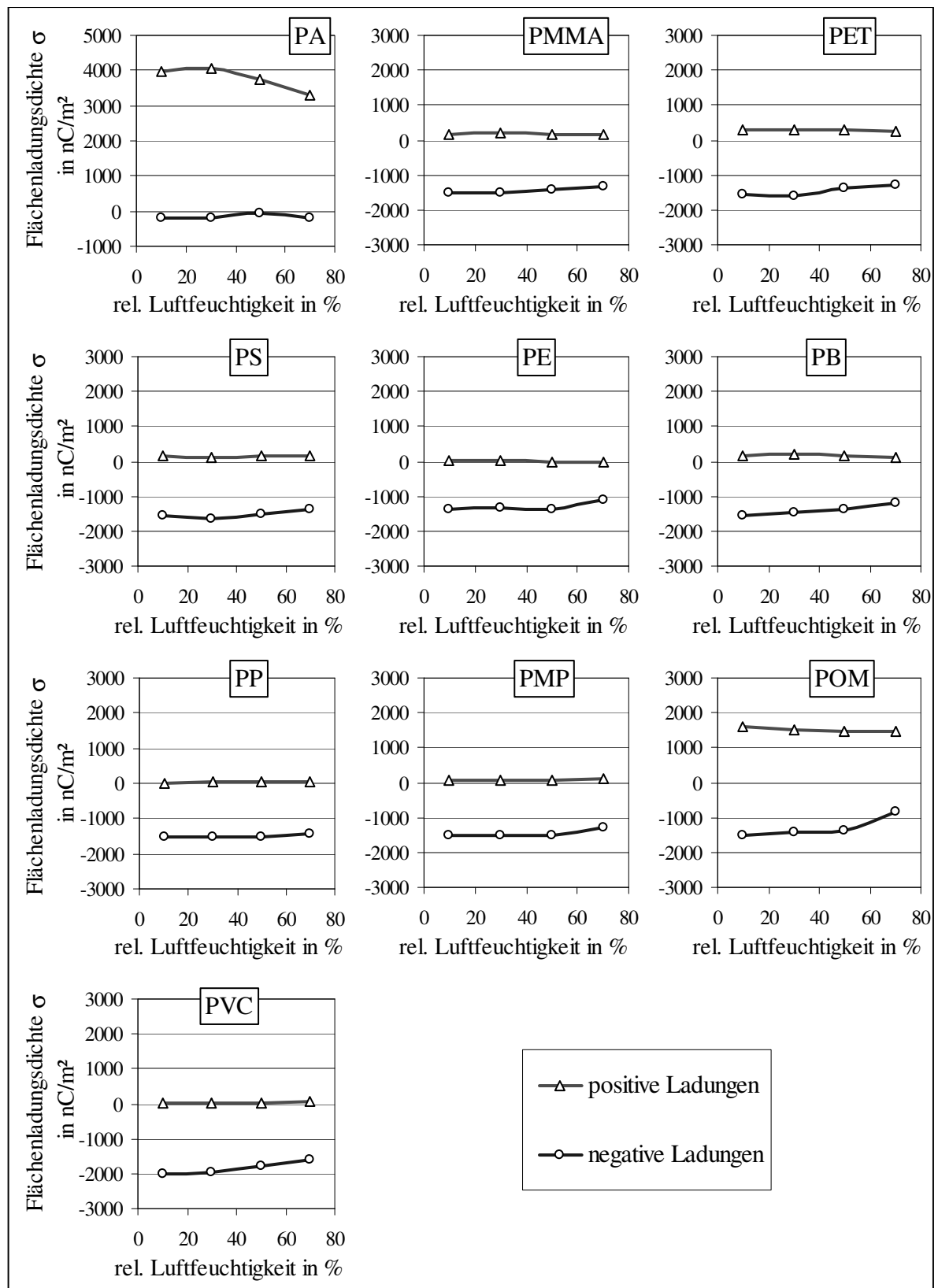


Bild 86: Aufladung der Kunststoffe in der Wirbelkammer mit vergoldeter Wandung in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit

### 6.2.2.3 Einfluss der Metallart der Wandung der Wirbelkammer

Von besonderem Interesse war die Frage, ob zwischen der Aufladung und dem metallischen Wandmaterial der Wirbelkammer ein Zusammenhang besteht. In der vorliegenden Literatur [27, 39 bis 55] waren sehr widersprüchliche Aussagen zum Einfluss der Elektronenaustrittsarbeit der Metalle auf die Aufladung der Kunststoffe zu finden. Deshalb wurde die Wirbelkammer aus verschiedenen metallischen Wandmaterialien (Al, Cu, Zn, Ag, Au, Ni) hergestellt. Die Oberflächen der Metalle waren nach Untersuchungen mittels XPS geringfügig oxidiert und wiesen geringe Kohlenwasserstoff-Kontaminationen auf.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den **Bildern 87** und **88** dargestellt. Sie zeigen, dass bei Metall/Kunststoff-Kontaktierung zwischen der Aufladung der Kunststoffe und der Art der Metallwandung der Wirbelkammer kein deutlicher Zusammenhang besteht. Die in der Literatur heftig diskutierte Aussage, dass die triboelektrische Aufladung der Kunststoffe mit der Differenz der Elektronenaustrittsarbeiten der Kontaktpartner zusammenhängt (s. **2.2.1**), kann man nicht bestätigen. Die unpolaren bzw. wenig polaren Kunststoffe, aber auch PET, PMMA und PVC luden sich bei Kontakt mit den verschiedenen Metallen weitestgehend einheitlich negativ auf.

Das Aufladungsverhalten des PA gegenüber den Metallen ist mit erheblichen Streuungen der Messwerte verbunden (**Bild 87**). Dieses Verhalten wurde auch von *Akande* and *Lowell* [49] beobachtet, die die Aufladung von PA mit 15 unterschiedlichen Metallen untersuchten. Ihre Aufladungsexperimente wurden in Vakuum durchgeführt, was eine Beeinflussung durch die umgebende Atmosphäre ausschließt. Jedoch waren die mit den Kunststoffen kontaktierenden Metalloberflächen leicht oxidiert. Die starke Streuung der Aufladung bei PA könnte somit auf das sensible Verhalten des Ladungstransfers gegenüber Verunreinigungen, wie z. B. Oxidschichten auf der Metalloberfläche hinweisen.

Unabhängig von der Metallart der Wirbelkammer behält POM seine ausgeprägte und starke bipolare Aufladung.



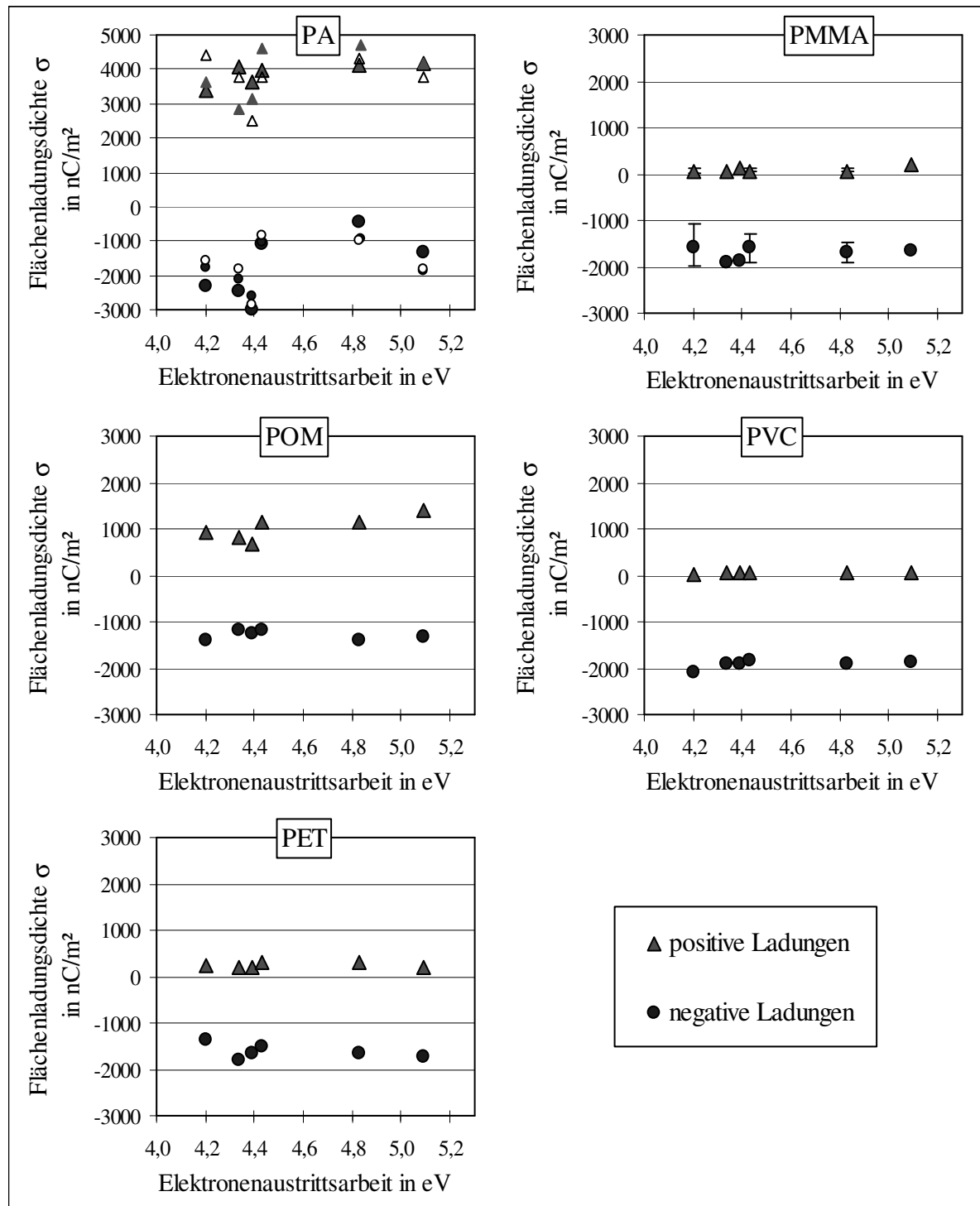


Bild 87: Aufladung von PA, PMMA, POM, PVC und PET in einer Wirbelkammer bei Variation des Wandmaterials

Die Balken bei PMMA geben den Streubereich der Einzelmesswerte an.

Elektronenaustrittsarbeiten [156]: Al: 4,2 eV; Zn: 4,34 eV; Cu: 4,39 eV; Ag: 4,43 eV;

Au: 4,83 eV; Ni: 5,09 eV

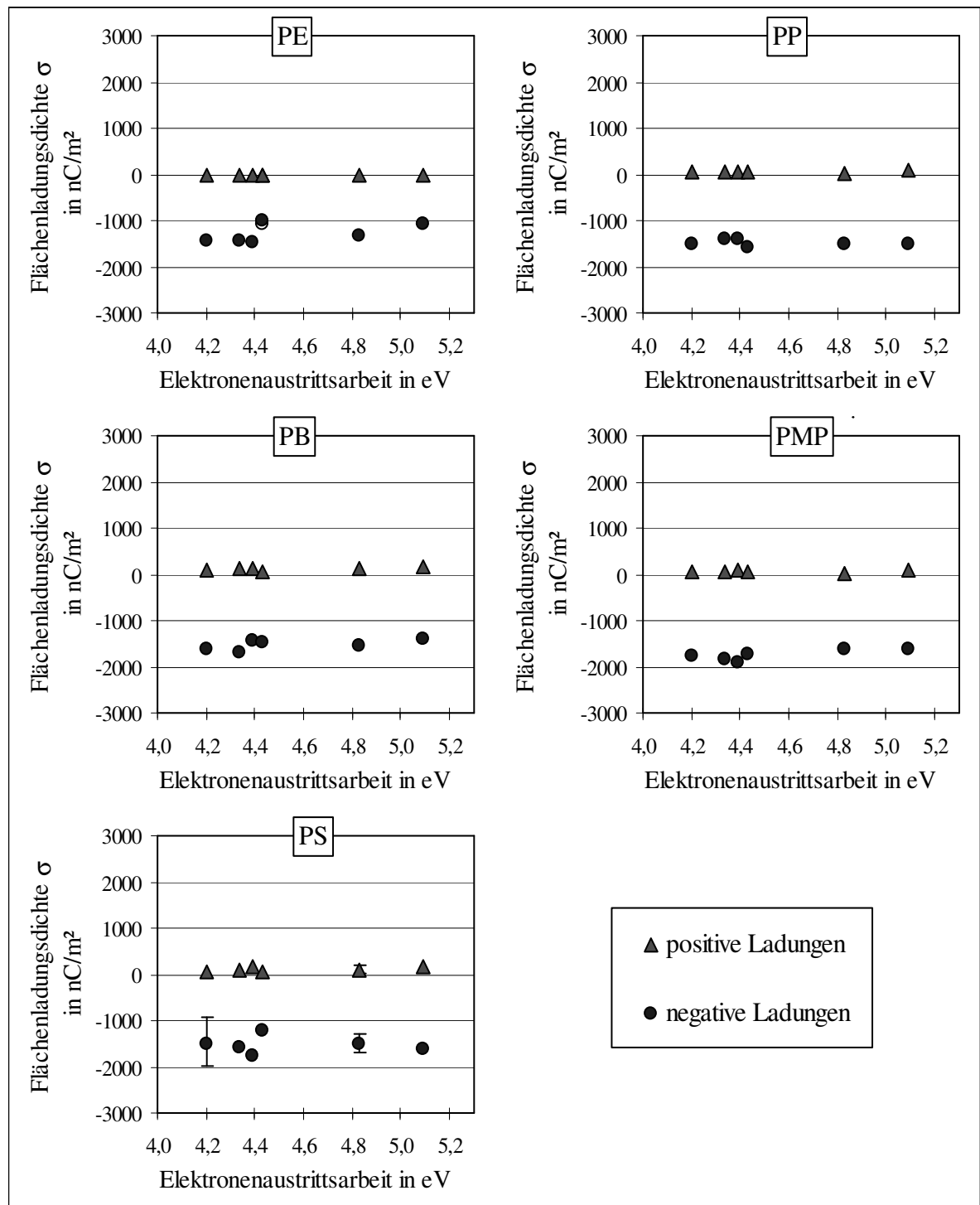


Bild 88: Aufladung von PE, PP, PB, PMP und PS in einer Wirbelkammer bei Variation des Wandmaterials

Die Balken bei PS geben den Streubereich der Einzelmesswerte an.

Elektronenaustrittsarbeiten [156]: Al: 4,2 eV; Zn: 4,34 eV; Cu: 4,39 eV; Ag: 4,43 eV;

Au: 4,83 eV; Ni: 5,09 eV

#### 6.2.2.4 Einfluss der wirksamen Kontaktfläche der Metallwandung

Die unpolaren bzw. wenig polaren Kunststoffe wie z. B. PE laden sich in einer mit artgleichem Kunststoff beschichteten Wirbelkammer nicht oder nur geringfügig auf. Wird dagegen die Aufladung in einer Wirbelkammer mit metallischer Wandung durchgeführt, erfahren diese Kunststoffe eine negative Aufladung.

Es wird vermutet, dass die während des Kontaktierungsvorgangs transportierte Ladungsmenge mit der wirksamen Kontaktfläche der Metallwandung in Verbindung steht. Um das zu überprüfen, wurde die metallische Wandung (Al) der Wirbelkammer mit dem entsprechenden artgleichen Kunststoff (PE) beschichtet, wobei man unterschiedliche Bedeckungsgrade herstellte.

Die Ergebnisse sind in **Bild 89** dargestellt.

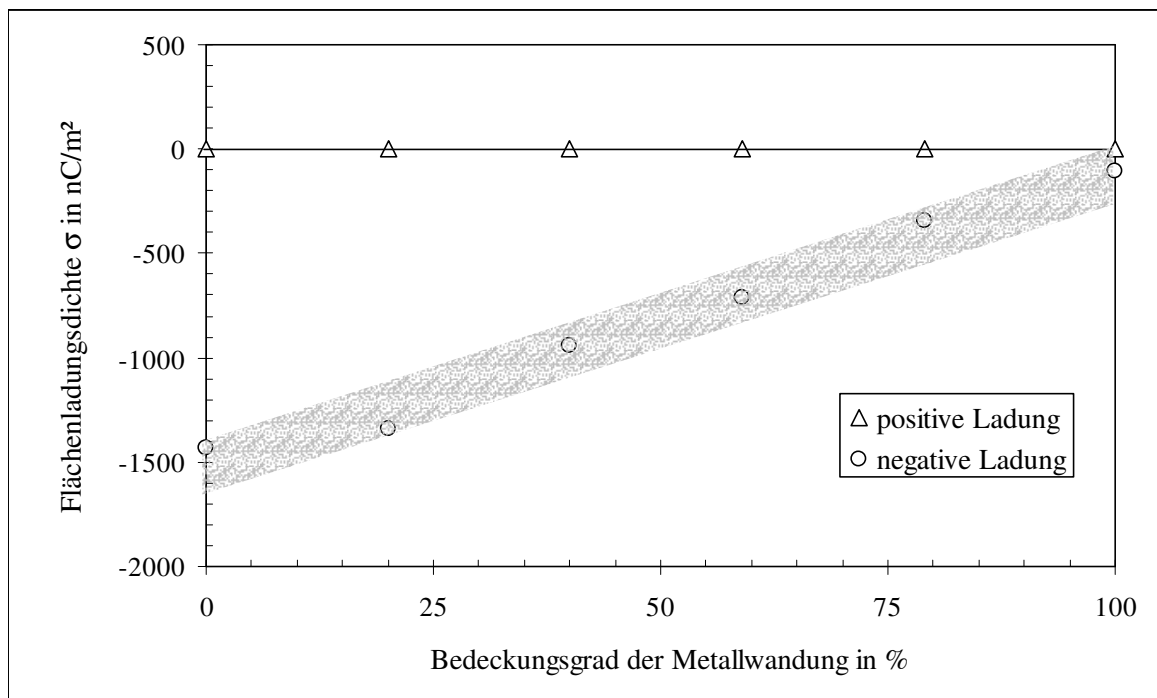


Bild 89: Abhängigkeit der Aufladung des PE vom Bedeckungsgrad der Al-Wandung der Wirbelkammer mit artgleichem Kunststoff

Man kann deutlich erkennen, dass die negative Aufladung von PE durch den Kontakt mit der Metallwandung der Wirbelkammer bestimmt wird. Die stärkste Aufladung erfolgte in der rein metallischen Wirbelkammer. Mit zunehmendem Bedeckungsgrad nimmt die Kontaktwahrscheinlichkeit der Teilchen mit der Metallwandung und damit ihre Aufladung linear ab.

#### 6.2.2.5 Einfluss der Zusammensetzung der Kunststoffe

Der Einfluss der Zusammensetzung der Kunststoffe auf die triboelektrische Aufladung wurde am Beispiel von PVC untersucht.

Die PVC-Proben wurden mit der in **Tabelle 13** angegebenen Zusammensetzung im Eilenburger Compound Werk GmbH (ECW GmbH) bzw. im Kabelwerk Lausitz GmbH hergestellt. Als Füllstoff diente  $\text{CaCO}_3$ -Pulver.

Tabelle 13: Zusammensetzung der PVC-Proben

Bezeichnung der Probe	PVC in %	Füllstoff in %	Weichmacher in %	Stabilisator in %	Farbstoff in %
A	28,8	7,1	12,1	2,0	50,0
B	48,0	-	50,0	2,0	-
C	58,5	5,8	28,7	7,0	-
D	67,2	-	30,0	2,8	-
E	48,0	30,0	20,0	2,0	-
F	46,8	28,1	23,0	2,1	-
G	57,5	14,2	24,2	4,1	-
H	96,0	-	-	4,0 <sup>*)</sup>	-
I	ca. 96,0	-	-	ca. 4,0 <sup>*)</sup>	-

<sup>\*)</sup> H und I mit unterschiedlichen Stabilisatoren

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Aufladung insbesondere durch den PVC-Anteil im Kunststoff bestimmt wird (**Bild 90**).

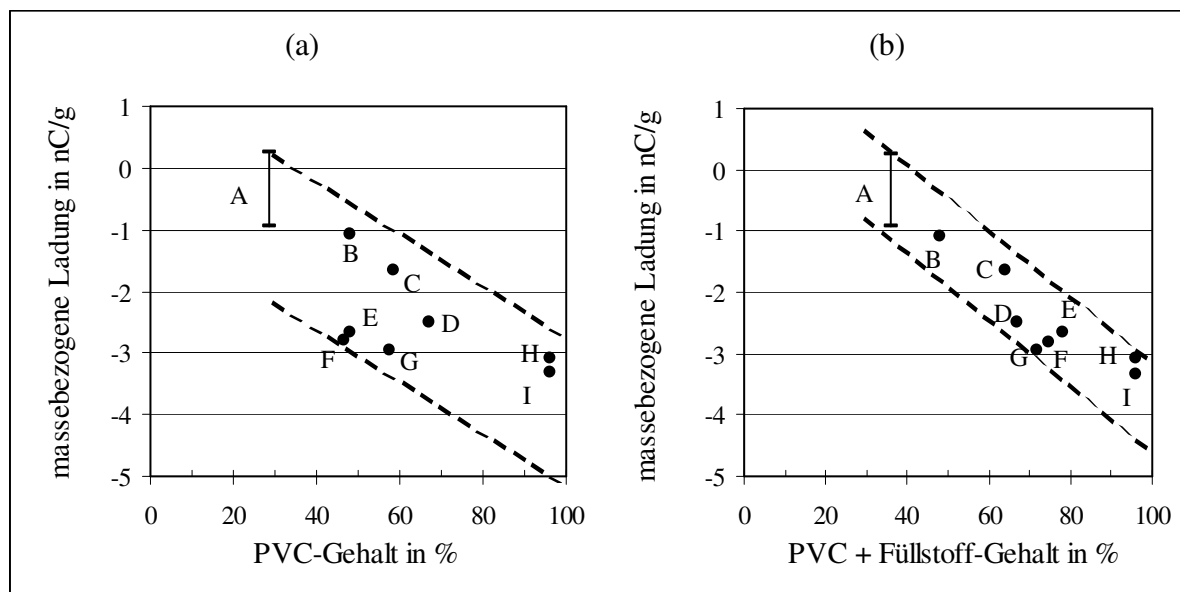


Bild 90: Einfluss der Zusammensetzung des PVC auf die triboelektrische Aufladung

Die beigefügten Füllstoffe, Weichmacher, Stabilisatoren und Farbstoffe können die spezifische Aufladung verstärken bzw. verringern. Die Streubreite der Messergebnisse für die PVC-Probe A resultierte aus zwölf Messungen, wobei die PVC-Proben unterschiedliche Farbstoffe enthielten.

### 6.3 Aufladung von Zweikomponenten-Gemischen

Für die Aufladung von einzelnen Kunststoffen in einer mit artgleichem Kunststoff beschichteten bzw. in einer metallischen Wirbelkammer erwies sich die Lewis-Azidität bzw. -Basizität der Kunststoffoberfläche als entscheidender Parameter für den Ladungstransport zwischen den Kontaktflächen. Man kann davon ausgehen, dass der Ladungsvorgang auch bei der Aufladung in einem Zweikomponenten-Gemisch von den Lewis-Säure/Base-Parametern bestimmt wird.

Als Grundlage zur Auswertung der Aufladung von Zweikomponenten-Gemischen dienten die Ergebnisse von *Mientkewitz* [14]. *Mientkewitz* untersuchte die triboelektrische Aufladung von Zweikomponenten-Gemischen in einer Schüttelapparatur, wobei u. a. die relative Luftfeuchtigkeit variiert wurde. Die verwendeten Versuchsmaterialien PA, PET, PS, PP, PE, POM und PVC waren identisch mit den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Kunststoffen. Anhand der vorliegenden Messwerte wird eine Quantifizierung des Aufladungsverhaltens der Zweikomponenten-Kunststoffgemische mit Hilfe der Lewis-Säure/Base-Eigenschaften der Gemischkomponenten angestrebt.

Die Formulierung eines entsprechenden Modells erfolgt auf der Grundlage folgender Überlegungen. Auch bei der Kunststoff/Kunststoff-Kontaktierung geht man von der Annahme aus, dass an der Oberfläche der Kunststoffe positiv und negativ aufladbare Bereiche existieren (**Bild 91**).

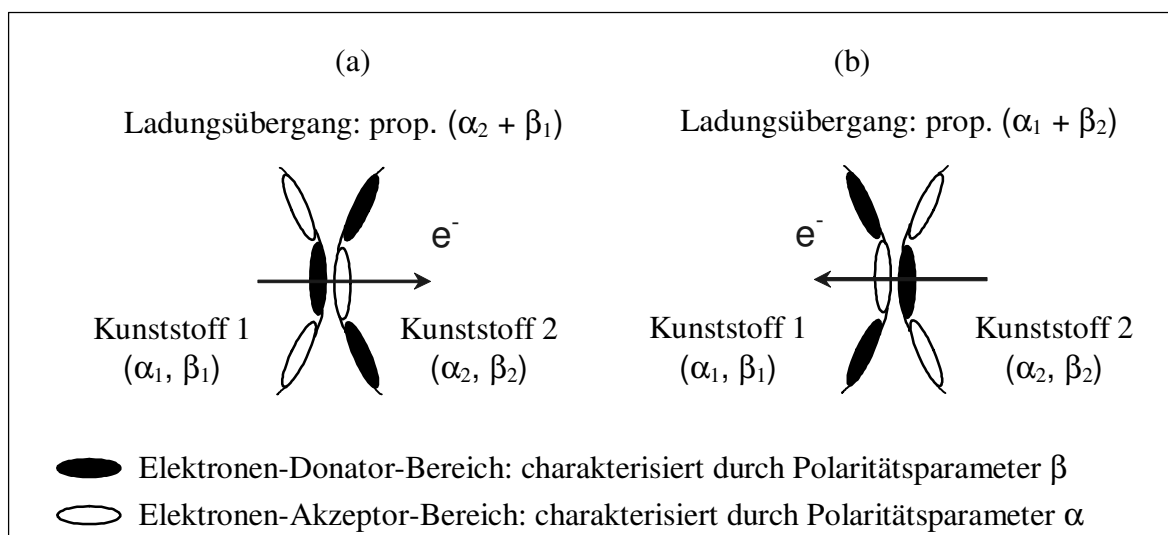


Bild 91: Modellvorstellung zur Kontaktaufladung von Kunststoffen in einem Zweikomponenten-Gemisch

- (a) Kontakt zwischen einem Donator-Bereich des Kunststoffes 1 und einem Akzeptor-Bereich des Kunststoffes 2
- (b) Kontakt zwischen einem Akzeptor-Bereich des Kunststoffes 1 und einem Donator-Bereich des Kunststoffes 2

Kontaktiert ein Donator-Bereich des Kunststoffes 1 (charakterisiert durch Polaritätsparameter  $\beta_1$ ) den Akzeptor-Bereich des Kunststoffes 2 (charakterisiert durch Polaritätsparameter  $\alpha_2$ ), erfolgt ein Ladungsübergang, der zu  $(\alpha_2 + \beta_1)$  proportional ist (**Bild 91a**). Kontaktiert ein Akzeptor-Bereich des Kunststoffes 1 (charakterisiert durch Polaritätsparameter  $\alpha_1$ ) den Donator-Bereich des Kunststoffes 2 (charakterisiert durch Polaritätsparameter  $\beta_2$ ), so erfolgt ein Ladungsübergang, der zu  $(\alpha_1 + \beta_2)$  proportional ist (**Bild 91b**). Entstehen viele Kontakte zwischen den Teilchen, wird die Summe der Ladungsübergänge die Aufladung bestimmen. Diese hängt von der Polaritätsparameter-Differenz

$$\Delta p_N = [(\alpha_2 + \beta_1) - (\alpha_1 + \beta_2)]/2 \quad (24)$$

ab. Sie charakterisiert den Ladungsübergang zwischen zwei einander kontaktierenden Kunststoffen. Mit dem Teiler Zwei wird die Kontaktwahrscheinlichkeit der Gemischkomponente 1 mit der Gemischkomponente 2 in einem Zweikomponenten-Gemisch mit einem Masseanteil von 1:1 berücksichtigt. Ist  $\Delta p_N > 0$ , wird Kunststoff 1 eine positive und Kunststoff 2 eine negative Aufladung erhalten. Bei  $\Delta p_N < 0$  ist die Ladungspolarität umgekehrt.

In der Realität stellt die triboelektrische Aufladung in einem Zweikomponenten-Gemisch ein wesentlich komplexeres Phänomen dar. So wird der o. g. Aufladungsvorgang durch die Kontaktierung der Teilchen mit der Metallwand der Aufladungsapparatur, die Kontaktierung zwischen arteigenen Kunststoffteilchen und von auftretenden Entladungserscheinungen überlagert.

Eine Auswertung der Messwerte von [14] unter Einbeziehung der Lewis'schen Polaritätsparameter  $\alpha$  und  $\beta$  lieferte für den relativen Luftfeuchtigkeitsbereich  $\varphi = 10 \dots 70 \%$  einen deutlichen Zusammenhang (**Bilder 92 und 93**).

Zu beachten ist, dass die im Gemisch entstehende Flächenladungsdichte eines Kunststoffes entscheidend höher liegen kann als in einer Einkomponenten-Kunststoffprobe. Nach der gewählten Aufladungszeit von  $t_A = 5 \text{ min}$  war die maximale Flächenladungsdichte der Komponenten in den meisten Gemischen offensichtlich bereits erreicht. Für eine starke Aufladung eines Gemisches reicht es i. a. aus, wenn *eine* Gemischkomponente stärkere polare Eigenschaften besitzt.

Die Ursachen für die abnehmende Aufladung einiger Zweikomponenten-Gemische bei einer Luftfeuchtigkeit von  $\varphi = 70 \%$  sind gegenwärtig nicht zu deuten. Sie lassen sich aus einem veränderten spezifischen Oberflächenwiderstand der Kontaktpartner bei den hohen relativen Luftfeuchtigkeiten nicht erklären. Auch fehlen z. Z. noch geeignete Ansatzpunkte, die eine Deutung des Verhaltens von POM/PET-Gemischen, wobei sich POM positiv und PET negativ auflädt, erlauben.

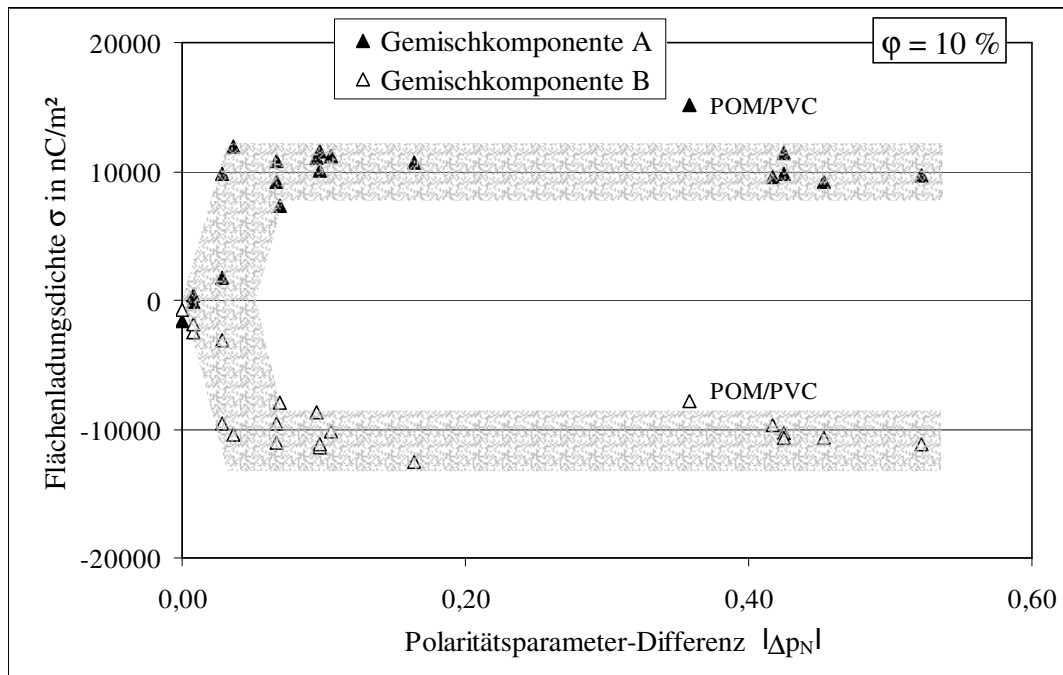


Bild 92: Einfluss der Polaritätsparameter-Differenz  $\Delta p_N$  auf die Flächenladungsdichte von Zweikomponenten-Gemischen bei  $\phi = 10\%$

Aufladungseinheit: Schüttelapparat mit einer Wandung der Aufladungskammer aus legiertem Stahl;  $t_A = 5$  min

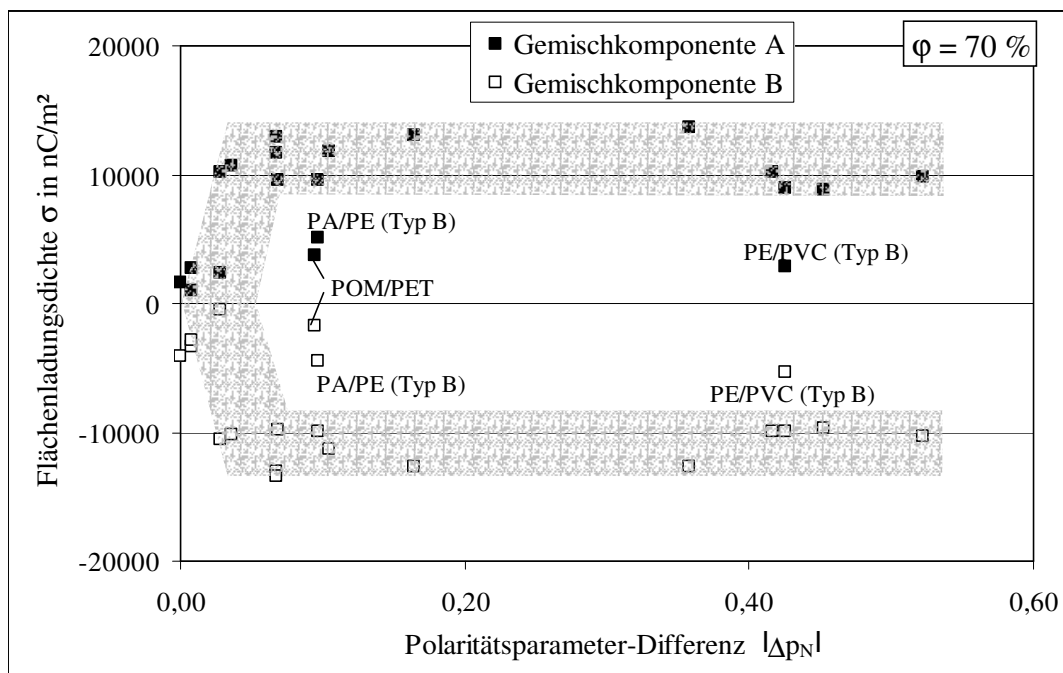


Bild 93: Einfluss der Polaritätsparameter-Differenz  $\Delta p_N$  auf die Flächenladungsdichte von Zweikomponenten-Gemischen bei  $\phi = 70\%$

Aufladungseinheit: Schüttelapparat mit einer Wandung der Aufladungskammer aus legiertem Stahl;  $t_A = 5$  min

Bringt man die aus den spezifischen Oberflächenwiderständen der Gemischkomponenten berechneten Oberflächenwiderstandsverhältnisse mit den Flächenladungsdichten in Zusammenhang, ergibt sich ein bemerkenswertes Bild (**Bild 94**). Bei Kunststoffgemischen,

deren Komponenten ein höheres Oberflächenwiderstandsverhältnis zueinander aufweisen, kann man mit stärkeren Aufladungen rechnen. Bei höheren Luftfeuchten ist die Korrelation weniger ausgeprägt.

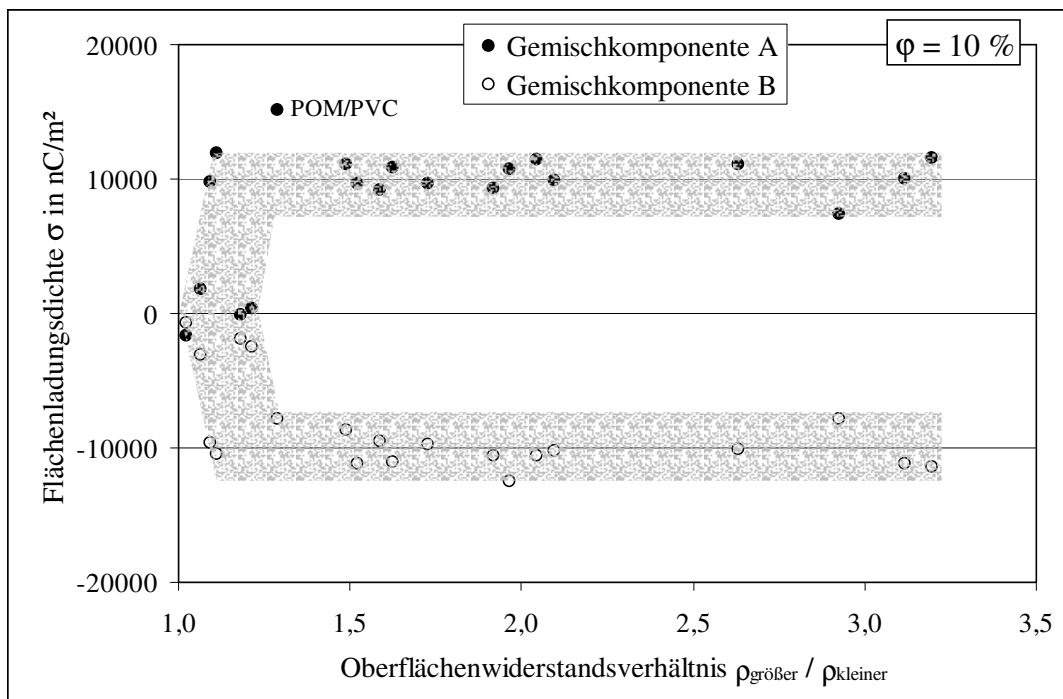


Bild 94: Einfluss des Oberflächenwiderstandsverhältnisses auf die Flächenladungsdichte von Zweikomponenten-Gemischen bei  $\varphi = 10 \%$

Aufladungseinheit: Schüttelapparatur mit einer Wandung der Aufladungskammer aus legiertem Stahl;  $t_A = 5 \text{ min}$

Die Aufladung der Kunststoffe im Zweikomponenten-Gemisch erfolgt nicht immer symmetrisch. Das heißt, dass die positive oder negative Ladung, die als Überschussladung bezeichnet wird, überwiegt. Diese Erscheinung dürfte mit Entladungserscheinungen in Verbindung stehen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Elektronenpaar-Akzeptor/Donator-Eigenschaften der Kunststoffoberflächen mindestens bis ca.  $\varphi = 50 \%$  relativer Luftfeuchtigkeit für das Aufladungsverhalten der Kunststoffe entscheidend sind.

Durch ein hohes Oberflächenwiderstandsverhältnis der Gemischkomponenten wird eine hohe Aufladung des Zweikomponenten-Gemisches gefördert. Das ist besonders unter dem Gesichtspunkt einer Beeinflussung der Aufladung, um einen möglichst starken und selektiven Ladungszustand der Kunststoffe im Gemisch zu erreichen, von Interesse.



## 6.4 Aufladung von Mehrkomponenten-Gemischen

Um Aussagen über das Aufladungsverhalten von Mehrkomponenten-Gemischen treffen zu können, wurden Versuchsreihen unter Standardbedingungen in einer Wirbelkammer mit goldbeschichteter Wandung durchgeführt. Die Zusammensetzung der untersuchten Gemische ergibt sich aus der nachfolgenden Übersicht:

Versuchsreihe 1:

- PA / PET / PS / PP / PE / POM / PVC
- PA / PET / PS / PP / PE / POM
- PA / PET / PS / PP / PE
- PA / PET / PS / PP
- PA / PET / PS
- PA / PET

Versuchsreihe 2:

- PA / PET / PS / PP / PE / POM / PVC
- PET / PS / PP / PE / POM / PVC
- PS / PP / PE / POM / PVC
- PP / PE / POM / PVC
- PE / POM / PVC
- POM / PVC

Versuchsreihe 3:

- PET / PS / PP / PE / POM
- PS / PP / PE / POM
- PET / PS / PP / PE
- PS / PP / PE
- PP / PE
- PS / PP

Die Gemische wurden ausgehend von einem 7-Komponenten-Gemisch dadurch gebildet, dass jeweils eine Komponente vom negativen bzw. positiven Ende der triboelektrischen Reihe weggelassen wurde. Für die Untersuchung des Aufladungsverhaltens in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit wurde das Gemisch PA / PET / PS / PP / PE / POM / PVC bei einer relativen Luftfeuchte von  $\phi = 10, 30, 50$  und  $70\%$  aufgeladen.

Die ermittelten Flächenladungsdichten der Versuchsreihen 1 bis 3 zeigen die **Bilder 95 bis 97**. Der Schwankungsbereich der Messwerte bei dem 7-Komponenten-Gemisch ist aus **Anlage 2** zu entnehmen.

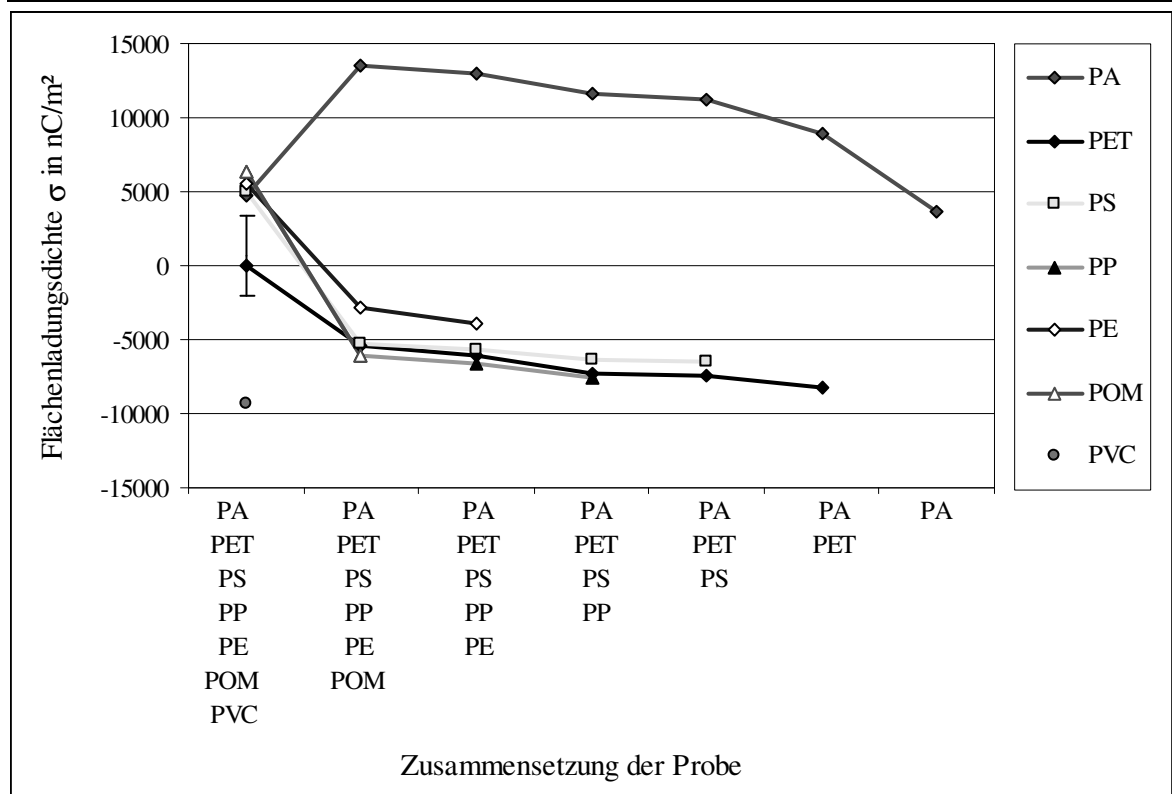


Bild 95: Aufladung der Kunststoffe in Mehrkomponenten-Gemischen

Versuchsreihe 1

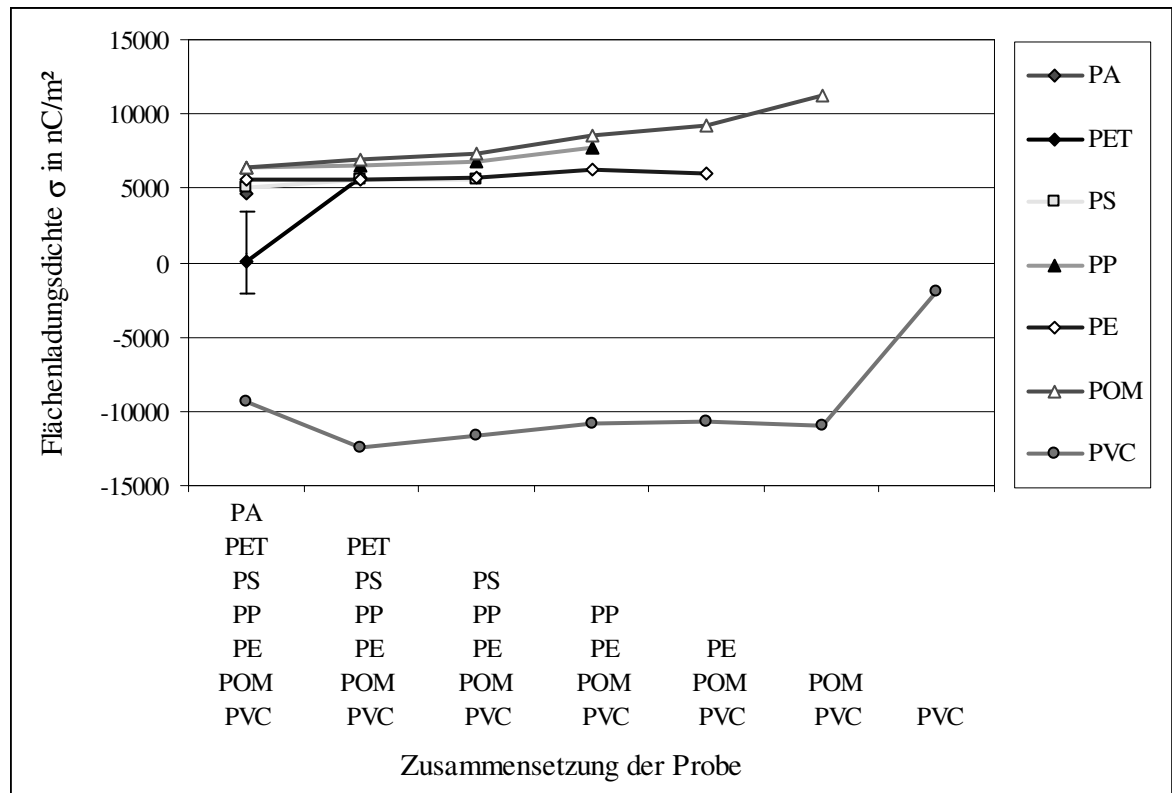
Relative Luftfeuchtigkeit:  $\varphi = 30\%$ 

Bild 96: Aufladung der Kunststoffe in Mehrkomponenten-Gemischen

Versuchsreihe 2

Relative Luftfeuchtigkeit:  $\varphi = 30\%$

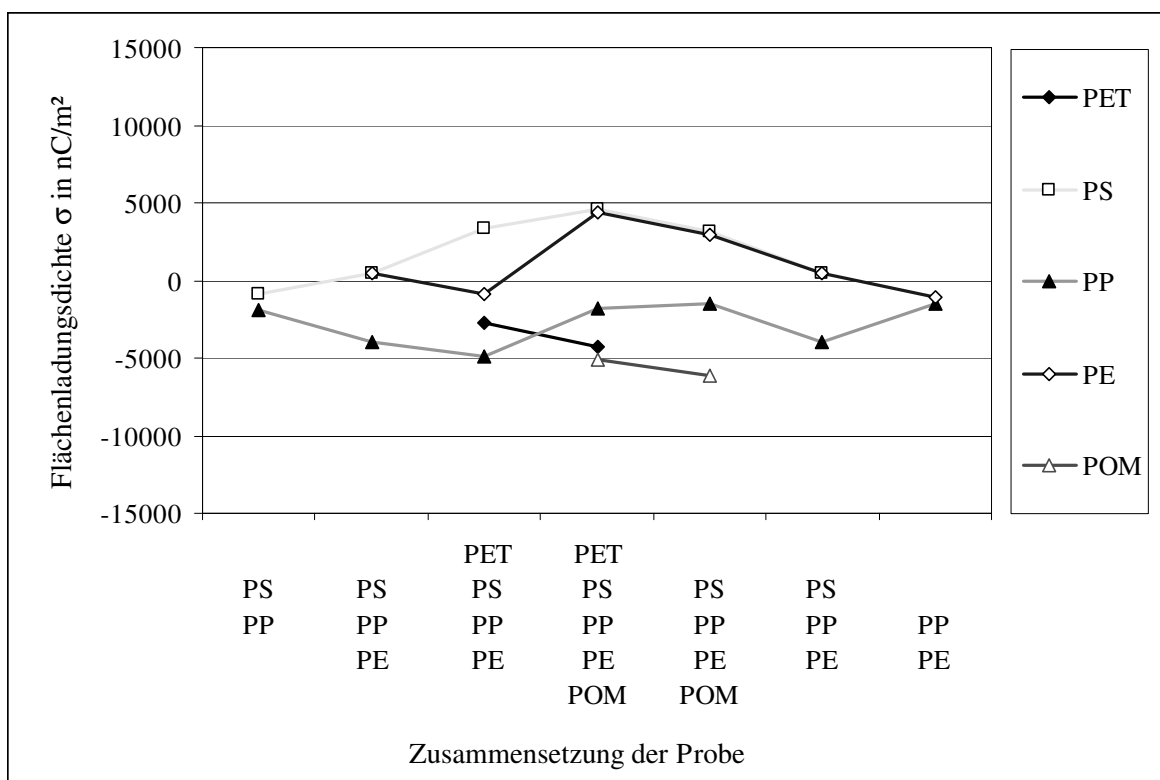


Bild 97: Aufladung der Kunststoffe in Mehrkomponenten-Gemischen  
Versuchsreihe 3

Relative Luftfeuchtigkeit:  $\varphi = 30 \%$

Die Kunststoffe laden sich in einem Mehrkomponenten-Gemisch nicht entsprechend der Reihenfolge in der triboelektrischen Reihe auf. Offensichtlich bestimmt der Kunststoff mit der stärksten Lewis-Säure- bzw. Lewis-Base-Eigenschaft den Ladungsvorgang. Für eine starke Aufladung der Gemischkomponenten genügt es, wenn nur *ein* Kunststoff im Gemisch hohe Polaritätsparameter besitzt, wie z. B. PVC oder PA (**Bilder 95** und **96**).

Betrachtet man die Polaritätsparameter der Kunststoffe (siehe **4.5**), ist von PVC in einem Gemisch eine dominierende negative Aufladung zu erwarten. Das wird in **Bild 96** eindeutig belegt. Die schwankende Aufladung des PET im 7-Komponenten-Gemisch könnte man auf die konkurrierende Aufladung durch PVC und PA bzw. auf die negative Aufladung von PET gegen POM zurückführen. Entfernt man PA aus dem Gemisch, erfährt auch PET im 6-Komponenten-Gemisch eine stark positive Aufladung. Die Ladungshöhe der positiv aufgeladenen Komponenten war bemerkenswert einheitlich und wurde vermutlich durch Entladungserscheinungen begrenzt. Eine weitere Differenzierung anhand der Polaritätsparameter ist nicht durchführbar.

Wurde PVC aus dem 7-Komponenten-Gemisch entfernt, wirkte PA für die Aufladung bestimmend (**Bild 95**). PA besitzt nach PVC die zweitstärksten polaren Eigenschaften. In Gemischen ohne starke polare Kunststoffe war die Ladungshöhe der Komponenten signifikant geringer (**Bild 97**). Bemerkenswert sind die deutlichen Unterschiede im Aufladungsverhalten zwischen PE und PP.

Weiterhin bemerkenswert sind die erheblichen negativen Überschussladungen in der Versuchsreihe 1 und die positiven Überschussladungen in der Versuchsreihe 2. Deren Deutung

ist aus heutiger Sicht nicht möglich. Es wird vermutet, dass die auftretenden Entladungsercheinungen dabei eine entscheidende Rolle spielen.

Erweitert man das für Zweikomponenten-Gemische aufgestellte Modell für ein Gemisch mit einer Komponentenanzahl  $n$ , so wird die Polaritätsparameter-Differenz für die jeweilige Komponente nach folgenden Überlegungen berechnet.

Die positiv und negativ aufladbaren Bereiche, charakterisiert durch die Lewis-Säure/Base-Parameter  $\alpha$  und  $\beta$ , an der Oberfläche einer beliebigen Gemischkomponente  $k$  kontaktieren die Bereiche der übrigen Gemischkomponenten 1 bis  $n$ . Der Ladungsübergang beim Kontakt mit der Komponente  $i$  wird dabei durch die Polaritätsparameter-Differenz der Kontaktpartner bestimmt (**Bild 98**).

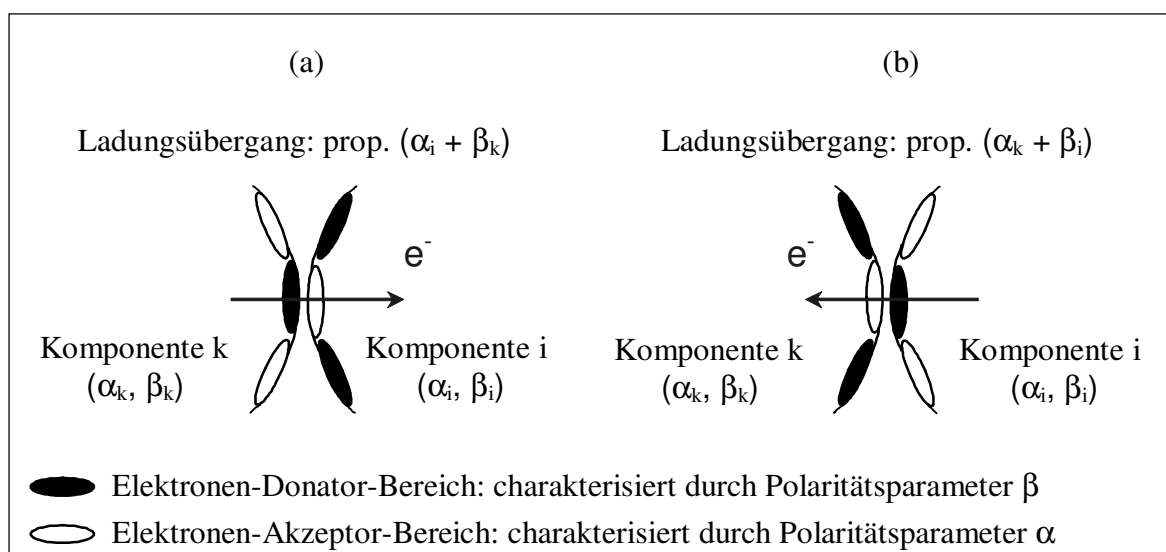


Bild 98: Modellvorstellung zur Kontaktaufladung der Kunststoffe in einem Mehrkomponenten-Gemisch

- (c) Kontakt zwischen einem Donator-Bereich des Kunststoffes  $k$  und einem Akzeptor-Bereich des Kunststoffes  $i$   
 (d) Kontakt zwischen einem Akzeptor-Bereich des Kunststoffes  $k$  und einem Donator-Bereich des Kunststoffes  $i$

Die Aufladung der Komponente  $k$  ergibt sich aus dem Ladungstransfer in beiden Richtungen. Berücksichtigt man, dass in einem Gemisch die Kontaktanzahl zwischen Komponente  $k$  und  $i$  nur einen Teil der Gesamtkontakte der Komponente  $k$  darstellt, kann man formulieren:

$$\Delta p_{N,i}(k) = [(\alpha_i + \beta_k) - (\alpha_k + \beta_i)] \cdot P_{k,i} \quad (25)$$

wo  $P_{k,i}$  den Kontaktanteil zwischen den Komponenten  $k$  und  $i$  im Gemisch beschreibt. Die in dieser Arbeit verwendeten Gemische wurden mit dem gleichen Masseanteil der Komponenten zusammengestellt. Es wird angenommen, dass eine Komponente jede weitere Gemischkomponente mit derselben Wahrscheinlichkeit kontaktiert. Daraus ergibt sich:

$$P_{k,i} = 1/n \quad (26)$$

wobei  $n$  die Anzahl der Gemischkomponenten ist.

Die für die Gesamtladung der Komponente  $k$  maßgebende Polaritätsparameter-Differenz berechnet man durch die Summation der Polaritätsparameter-Differenzen für die Kontakte mit den einzelnen Komponenten:

$$\Delta p_N(k) = \sum_{i=1}^n \Delta p_{N,i}(k) \quad (27)$$

Unter Verwendung der Gleichungen (25) und (27) ergibt sich:

$$\Delta p_N(k) = \sum_{i=1}^n [(\alpha_i + \beta_k) - (\alpha_k + \beta_i)] \cdot P_{k,i} \quad (28)$$

Ist  $\Delta p_N(k) > 0$ , wird von der Gemischkomponente  $k$  eine positive Aufladung erwartet. Bei  $\Delta p_N(k) < 0$  ist die Ladungspolarität negativ.

Die berechneten Werte für die Polaritätsparameter-Differenzen der Versuchsreihen 1 bis 3 werden in **Bild 99** mit der gemessenen Aufladung der Gemischkomponenten verglichen.

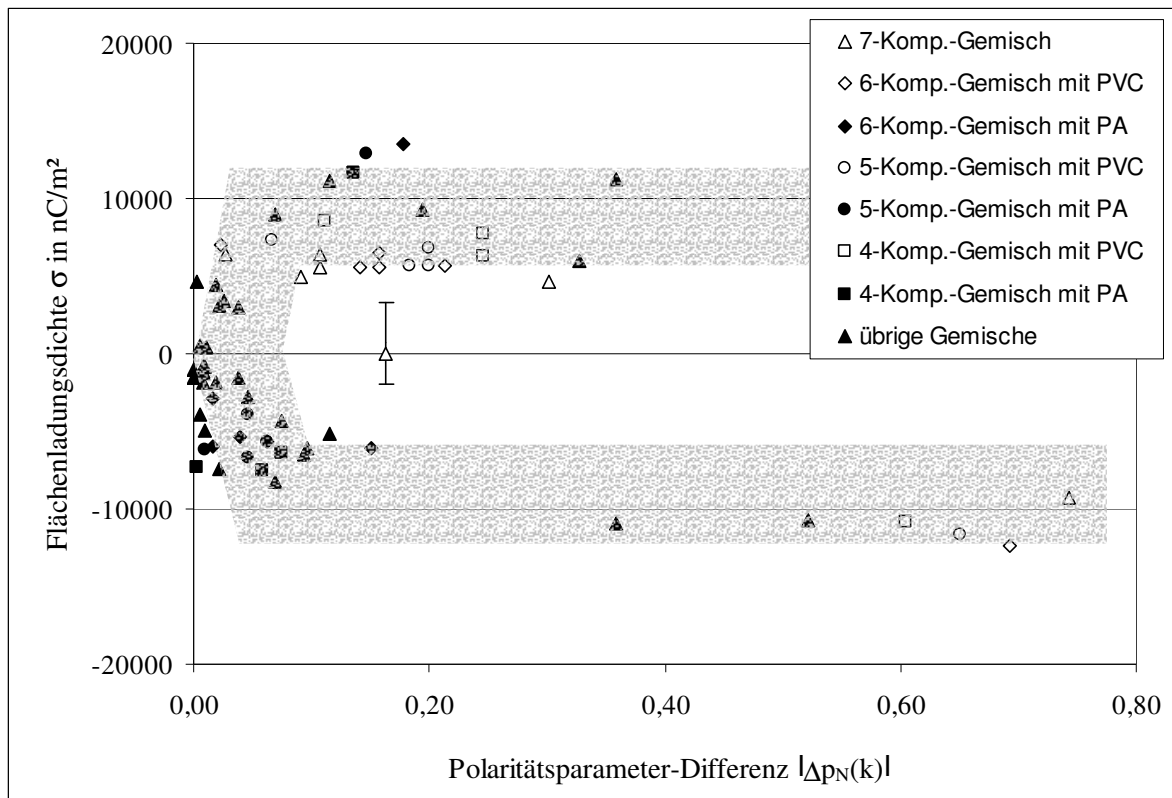


Bild 99: Aufladung der Kunststoff-Komponenten in Mehrkomponenten-Gemischen in Abhängigkeit von der Polaritätsparameter-Differenz  $|\Delta p_N(k)|$

Das Auftreten von Entladungserscheinungen begrenzt die Höhe der Ladungsdichte eines Gemisches. Eine Differenzierung unter den Kunststoffen anhand der Polaritätsparameter-

Differenz wird damit erschwert. Man kann jedoch erkennen, dass die Aufladung der Kunststoffe auch in einem Mehrkomponenten-Gemisch von den Lewis-Säure/Base-Eigenschaften der Komponenten abhängt. Eine hohe Polaritätsparameter-Differenz einer Komponente führt zu einer höheren Aufladung im Gemisch.

Dass die relative Luftfeuchtigkeit auch in einem Mehrkomponenten-Gemisch eine wichtige Rolle spielt, wird aus **Bild 100** deutlich.

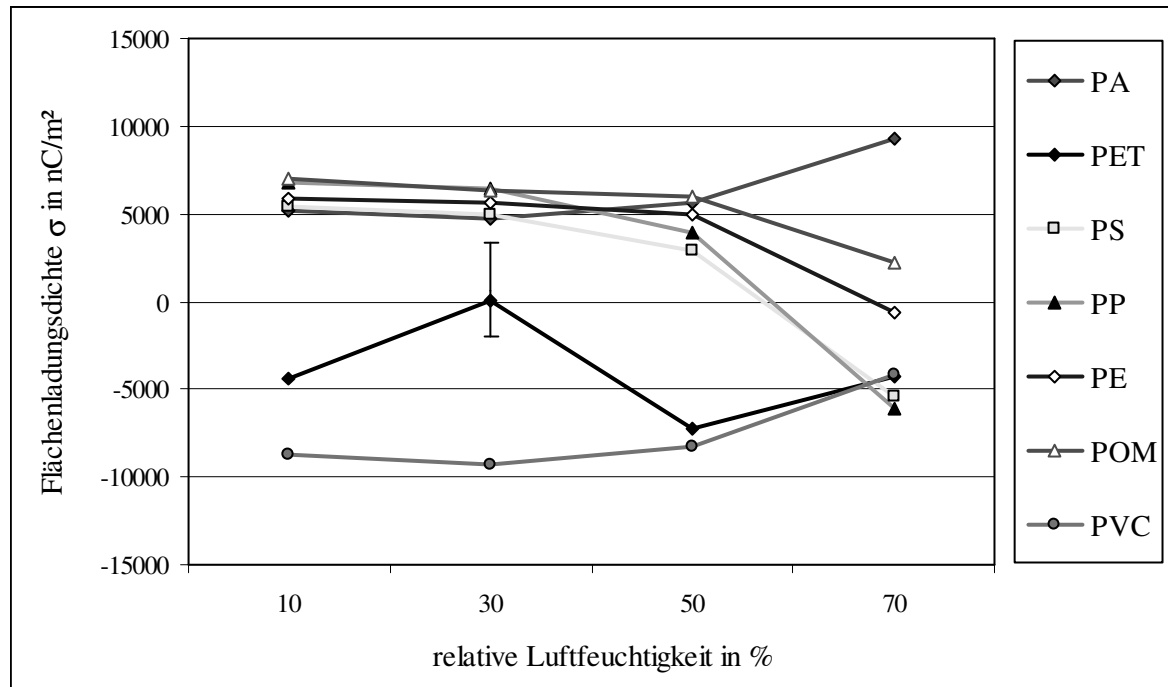


Bild 100: Abhängigkeit der Aufladung von der relativen Luftfeuchtigkeit in 7-Komponenten Gemisch

Die stark dominierende Aufladung des PVC gilt nur bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $\varphi = 50\%$ . Bemerkenswert ist die gravierende Änderung der Aufladung und der Polaritätswechsel der unpolaren bzw. wenig polaren Kunststoffe PE, PP und PS bei  $\varphi = 70\%$ . Als Ursache dafür kann die sprunghafte Zunahme der adsorbierten Wasserschichtdicke und die damit zusammenhängende Änderung des Oberflächenwiderstandes (siehe 4.3) gelten. Eine solche adsorbierte Wasserschicht wurde bei PS beobachtet (siehe 4.2).

Die Ladungsumkehr der unpolaren Gemischkomponenten PE, PP und PS deutet darauf hin, dass der Elektronentransport bei hohen relativen Luftfeuchtigkeiten von einem Ionenübergang zwischen den Kontaktflächen überlagert sein könnte.

## 7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für weiterführende Arbeiten

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das triboelektrische Aufladungsverhalten von Kunststoffgranulaten untersucht und dieses mit den Eigenschaften der Kunststoffoberfläche in Verbindung gebracht. Der aufgebaute Versuchsstand ermöglichte die Kunststoffe in einer Wirbelschicht unter definierten Bedingungen aufzuladen, in einem elektrostatischen Freifallscheider zu trennen und ihre Aufladung zu messen.

Dabei wurde der Schwerpunkt auf Einkomponenten-Kunststoffproben gesetzt. Nur so war es möglich die in früheren Arbeiten bei Zwei- und Mehrkomponenten-Gemischen auftretende Komplexität des Phänomens triboelektrische Aufladung zu reduzieren und eine Deutung der Aufladungserscheinungen zu realisieren. Die erreichten Ergebnisse bestätigten diese Vorgehensweise.

Eine umfangreiche Charakterisierung der Kunststoffoberfläche ermöglichte es, auf die Zusammenhänge zwischen triboelektrischem Aufladungsverhalten und der dafür verantwortlichen Oberflächeneigenschaften der Kunststoffe zu schließen.

Die *Charakterisierung der Kunststoffoberfläche* beinhaltet die Bestimmung folgender Eigenschaften:

- chemische Zusammensetzung<sup>\*)</sup>,
- Wasserdampfadsorption<sup>\*)</sup>,
- Verhalten von aufgetragenen Ladungen auf der Oberfläche<sup>\*)</sup>,
- Lewis-Säure/Base-Eigenschaften<sup>\*\*) und</sup>
- spezifischer Oberflächenwiderstand der Kunststoffe.

Mittels Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie konnte nachgewiesen werden, dass die chemische Zusammensetzung der Kunststoffoberfläche in jeder Präparationsform weitestgehend der aus der Strukturformel erwarteten entspricht. Eine Ausnahme bildete PVC, bei dem ein Zinnstabilisator und Sauerstoff nachgewiesen wurde.

Untersuchungen zur Wasseradsorption lieferten die Erkenntnis, dass PA, POM und PMMA im Vergleich mit den anderen Kunststoffen wesentlich mehr Wasser aufnehmen, wobei sich eine wasserhaltige Quellschicht ausbildet. Die Messung der Schichtdicke des auf PS adsorbierten Wassers zeigte bei höheren relativen Luftfeuchten eine sprunghafte Zunahme, was vermutlich mit einer Tropfenbildung des Wasserfilms in Verbindung steht.

Der zeitliche Verlauf des Abfließens von definiert aufgetragenen Oberflächenladungen wurde erstmals mit speziellen rasterkraftmikroskopischen Methoden visualisiert. So konnten z. B. auf der PS-Oberfläche mittels Electric Force Microscopy zeitlich stabile, positiv und negativ aufgeladene Ladungsdomänen, die unabhängig von der Topographie ver-

---

<sup>\*)</sup> Diese Untersuchungen wurden im Institut für Polymerforschung Dresden durchgeführt.

<sup>\*\*) Die ASF-Untersuchungen wurden am Lehrstuhl für Polymerchemie der Technischen Universität Chemnitz durchgeführt.</sup>

teilt sind, abgebildet werden.

Die Ergebnisse zur Untersuchung der Lewis-Säure/Base-Eigenschaften weisen darauf hin, dass die Oberfläche eines Kunststoffes sowohl Elektronen-Akzeptor- als auch Elektronen-Donator-Eigenschaften besitzen kann.

Für die Ermittlung des spezifischen Oberflächenwiderstandes fand eine neue Messmethodik Verwendung, mit welcher die die Messung störenden sog. Hintergrundströme eliminiert werden konnten. Die gemessenen Oberflächenwiderstände der Kunststoffe lagen in einem relativ engen Bereich und deutlich über den in der Literatur angegebenen Werten.

Das **Aufladungsverhalten der Kunststoffe** wurde für nachfolgend aufgeführte Kontaktierungsarten ermittelt:

- Kontaktierung von Kunststoffen gleicher Art,
- Kunststoff/Metall-Kontaktierung,
- Kontaktierung von Kunststoffen in Mehrkomponenten-Gemischen.

Für die Untersuchungen wurde ein bereits vorhandener elektrostatischer Laborfreifallscheider umgebaut und mit einer Wirbelkammer als Aufladungsapparatur ausgerüstet. Die Aufladung erfolgte in einer Wirbelschicht durch Kontaktierung der Teilchen miteinander und mit der Wandung der Wirbelkammer unter definierten und reproduzierbaren Versuchsbedingungen. Anschließend wurde die Schüttung im elektrostatischen Feld je nach Ladungspolarität getrennt und ihre Ladungshöhe mittels Faraday-Bechern gemessen.

Um die Höhe der Aufladung durch **Kontaktierung artgleicher Kunststoffe** zu bestimmen, wurden Versuche in einer Wirbelkammer mit artgleicher Kunststoffwandung durchgeführt. Unpolare Kunststoffe laden sich nicht oder geringfügig auf. Polare Kunststoffe zeichnen sich durch eine charakteristische bipolare Aufladung aus. Die Ursache der Bipolarität kann man mit dem Vorhandensein von direkt nebeneinander vorliegenden positiv und negativ aufladbaren Bereichen (Domänen) auf der Kunststoffoberfläche erklären.

Die aus der Aufladungskinetik berechnete Aufladungsgeschwindigkeit der Kunststoffe korreliert mit den Lewis-Säure/Base-Polaritätsparametern. Bei Kunststoffen mit stärkeren Elektronen-Akzeptor- bzw. -Donator-Eigenschaften verläuft der Aufladungsvorgang schneller.

Die relative Luftfeuchtigkeit erwies sich als wesentlicher Einflussfaktor auf die triboelektrische Aufladung. Mit zunehmender Luftfeuchtigkeit sinkt die Flächenladungsdichte bei den Kunststoffen, die viel Wasser adsorbieren können. Die Ursache hierfür wird in der Ausbildung von wasserhaltigen Quellschichten gesehen, die den Oberflächenwiderstand der Kunststoffe herabsetzen. Hierbei bildet POM eine Ausnahme. Die ermittelte Flächenladungsdichte von POM zeigt trotz des hohen Wasseraufnahmevermögens keine Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit.

Der gemessene spezifische Oberflächenwiderstand weist bei geringer relativer Luftfeuchtigkeit eine deutliche Korrelation mit den ermittelten Flächenladungsdichten der Kunststoffe auf. Es zeigte sich, dass eine gewisse Leitfähigkeit den Aufladungsvorgang begünstigt. Dementsprechend laden sich Kunststoffe mit geringerem Oberflächenwiderstand triboelektrisch stärker auf.



Die Aufladungskinetik wird auch bei einer **Kunststoff/Metall-Kontaktierung** durch die Elektronen-Akzeptor/Donator-Eigenschaften der Kunststoffoberfläche bestimmt.

Der spezifische Oberflächenwiderstand der Kunststoffe korreliert mit ihren ermittelten Flächenladungsdichten.

Eine Abhängigkeit der Ladungshöhe der Kunststoffe von der Elektronenaustrittsarbeit der kontaktierenden Metalle konnte nicht nachgewiesen werden. Die bei PA beobachtete zum Teil erhebliche Streuung der Messwerte ist vermutlich auf die an der Metalloberfläche ausgebildete Oxidschicht zurückzuführen.

Eine zunehmende relative Luftfeuchtigkeit bewirkt eine Abnahme der Ladungshöhe der Kunststoffe. Besonders ausgeprägt ist es bei Kunststoffen zu beobachten, die sich durch hohe Wasseradsorption auszeichnen. Die Ursache wird auch in diesem Fall in der Ausbildung von wasserhaltigen Quellschichten gesehen, die den Oberflächenwiderstand der Kunststoffe herabsetzen.

Sowohl die Auswertung der in der Literatur veröffentlichten Ergebnisse mit **Zweikomponenten-Gemischen** als auch die eigenen Versuche mit **Mehrkomponenten-Gemischen** lieferten die Erkenntnis, dass das Aufladungsverhalten der Kunststoffe auch in Gemischen von ihren Lewis-Säure/Base-Eigenschaften abhängt. Der Ladungsvorgang ist jedoch von Entladungserscheinungen überlagert, wodurch die maximale Flächenladungsdichte begrenzt wird.

Ist in einem Mehrkomponenten-Gemisch ein Kunststoff mit stark polarem Charakter vorhanden, dominiert er während des Ladungsvorganges und bestimmt die Polarität der restlichen Gemischkomponenten. Das ist für die Trennung von Kunststoffgemischen im elektrostatischen Feld von Bedeutung.

Die relative Luftfeuchtigkeit übte im untersuchten 7-Komponenten-Gemisch auf die Aufladung einen erheblichen Einfluss aus. Die beobachtete Ladungsumkehr mehrerer unpolarer Gemischkomponenten bei hohen Luftfeuchtigkeiten weist darauf hin, dass der Elektronentransfer von einem Ionenübergang zwischen den Kontaktflächen überlagert ist.

Im Folgenden werden **Schlussfolgerungen für weiterführende Arbeiten** auf die noch offenen Fragen angegeben.

Der gegenwärtige Kenntnisstand erlaubt nur begrenzt, Polarität, Höhe und Geschwindigkeit der triboelektrischen Aufladung von Kunststoffen vorauszusagen. Das gilt besonders dann, wenn der Ladungsvorgang durch Wasser beeinflusst wird. Der Einfluss des Wassers auf das Auf- und Entladungsverhalten der Kunststoffe ist bisher nur teilweise aufgeklärt. Diese Frage könnte einerseits mittels Untersuchungen in der Wirbelschicht durch Konditionierung und Aufladung der Kunststoffe bei sehr niedriger relativer Luftfeuchtigkeit, wie z. B. unter Stickstoffatmosphäre, geklärt werden. Andererseits könnte der Abfluss von gezielt an den Kunststoffoberflächen aufgebrachten Ladungen mittels EFM-Techniken in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit der umgebenden Luft visualisiert werden. Von den Ergebnissen erwartet man unter Einbeziehung der Oberflächenwiderstandsmes-

sungen, dass die Leitungsvorgänge bei höherer relativer Luftfeuchtigkeit besser verstanden werden.

Weiterhin unbekannt blieb der Einfluss des Wassers auf die laterale Anordnung der Ladungsdomänen sowie deren zeitliche Konstanz. Es wäre von Interesse, sowohl die laterale Verteilung der Ladungsdomänen auf der Kunststoffoberfläche als auch ihre zeitliche Stabilität in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit zu charakterisieren.

Bei Mehrkomponenten-Gemischen, die stark polare Kunststoffe wie PA oder PVC enthalten, ist die maximale Ladungshöhe relativ schnell erreicht. Außerdem wird diese durch Entladungserscheinungen begrenzt. Dadurch liegt die Ladungshöhe mehrerer Gemischkomponenten in einem relativ engen Bereich. Für die bessere Differenzierung der Ladungshöhe der Gemischkomponenten sollte man aufladungskinetische Untersuchungen durchführen. Es wird dabei erwartet, dass bei geringerer Aufladungszeit bzw. Ladungshöhe die Entladungserscheinungen den Aufladungsvorgang in geringerem Maß beeinflussen. Das würde eine günstigere Vergleichbarkeit des Ladungszustandes mit den Elektronen-Akzeptor/Donator-Eigenschaften der Gemischkomponenten ermöglichen. Weiterhin könnte man auf die Ursache der u. U. erheblichen Überschlusssladungen eines Gemisches schließen.

Zwischen der mittels In-Stream-Sonde und Faraday-Becher ermittelten Ladungshöhe besteht wegen des Auftretens von Gasentladungen keine strenge Korrelation. Diesem Sachverhalt ist nachzugehen. Dabei sollte geklärt werden, unter welchen Bedingungen und in welchem Umfang Gasentladungen in der Wirbelschicht auftreten bzw. wie diese die Ladungsverhältnisse der Kunststoffoberfläche beeinflussen.

Additive, wie z. B. Farbstoffe, Füllstoffe und Weichmacher, können das triboelektrische Aufladungsverhalten eines Kunststoffes deutlich verändern. Um die Auswirkung der Additive auf den Aufladungsvorgang zu klären, wäre es notwendig, Kunststoffe mit bekannten Zusatzstoffen zu untersuchen.

Es wäre von besonderem Interesse, neue Ansatzpunkte für eine selektive Aufladung der unterschiedlichen Kunststoffe mittels Beeinflussung der triboelektrischen Aufladung durch Modifizierung der Oberfläche zu finden. Dabei bietet sich z. B. eine Behandlung mit Reagenzien bzw. eine Zugabe von Feinstgut an. Eine weitere Möglichkeit für eine Beeinflussung der Aufladung wäre die Behandlung der Wandoberfläche des Aufladungsapparates mit Reagenzien bzw. die Anlegung einer Gleichspannung an die Wandung. Ausgehend von den Ergebnissen, die mit Einkomponenten-Kunststoffproben erzielt werden, sollte man schließlich die erfolgsversprechenden Möglichkeiten zur Beeinflussung der Kontaktaufladung der Kunststoffe in Mehrkomponenten-Gemischen überprüfen.

Die Additive enthaltende bzw. modifizierte Kunststoffoberfläche kann wiederum mit verschiedenen Techniken, wie ASF, EFM, XPS, Wasserdampfadsorptions-Messungen bzw. Oberflächenwiderstandsmessungen untersucht und charakterisiert werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Kober, P.; Köhnlechner, R.: Trockene triboelektrische Separation von Kunststoffgemischen. 2. Kolloquium Sortieren am 11. und 12. Oktober 2001 in Berlin, Tagungsband, (2001), S. 184 - 192
- [2] Meyer-Staude, R.; Köhnlechner, R.: Triboelektrische Sortierung im industriellen Maßstab. 8. Kunststoff-Recycling Kolloquium am 9. und 10. September 1999 in Krefeld, Tagungsband, (1999), S. 2.43 - 2.51
- [3] hamos GmbH: Elektrostatische Separatoren zur Kunststoff-Kunststoff-Trennung, Internet: <http://www.hamos.com>, 15.05.(2002)
- [4] Kleine-Kleffmann, U.; Hollstein, A.; Stahl, I.: Dry separation method for mixed plastics. Davos Recycle`92 International Forum and Exposition, Davos/Switzerland, (1992), S. 5/6-1 - 5/6-14
- [5] Kali und Salz AG.: Vermischte Kunststoffabfälle elektrostatisch trennen. Plastverarbeiter 44 (1993), S. 26 - 30
- [6] Beier, P.-M.: Fortschritte bei ESTA und Flotation. Kali und Steinsalz 12 (1996), S. 57 - 62
- [7] Hoche, A.; Stahl, I.: Anwendung eines elektrostatischen Sortierverfahrens für Kunststoffe. Kolloquium Sortieren am 7. und 8. Oktober 1999 in Berlin, Tagungsband, S. 299 - 303
- [8] Inculet, I. I.; Castle, G. S. P.: Tribo-electrification of commercial plastics in air. Inst. Phys. Conf. Ser. No. 118: Section 4, (1991), S. 217 - 222
- [9] Niermöller, F.: Ladungsverteilung in Mineralgemischen und elektrostatische Sortierung nach Triboaufladung. Dissertation, TU Clausthal, 1988
- [10] Cross, J. A.: Electrostatics: Principles, Problems and Applications. Bristol: Adam Hilger, 1987
- [11] Moshkin, A. A.; Moshkina, S. A.: Electrical filters made of polymer materials. Journal of Electrostatics 40&41 (1997), S. 401 - 406
- [12] Riehle, C.; Löffler, F.: Electrical similarity concerning particle transport in electrostatic precipitators. Journal of Electrostatics 29 (1992), S. 147 - 165
- [13] Kleber, W.; Lang, A.: Triboelectrically charged powder coatings generated by running through holes and slits. J. of Electrostatics 40&41 (1997), S. 237 - 240
- [14] Mientkewitz, O.: Die triboelektrische Aufladung von Kunststoffen für die Trennung in einem elektrostatischen Feld. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2000

- 
- [15] Schultz, T.: Untersuchungen zur elektrostatischen Sortierung der Kunststoffe Polypropylen und Polyethylen auf einem Freifallscheider unter besonderer Berücksichtigung chemischer Konditionierung. Dissertation, RWTH Aachen, 2000
- [16] Pong, W.; Brand, D.; Ho, Z.; Peleg, M.: Contact charging of insulating polymers. J. Appl. Phys. 58 (1985), S. 896 - 901
- [17] Philippow, E.: Grundlagen der Elektrotechnik. 9. Auflage, Berlin, München: Verlag Technik, 1992, S. 407 - 409
- [18] Ku, C. C.; Liepins, R.: Electrical Properties of Polymers. München: Hanser Verlag, 1987, S. 228
- [19] Taylor, D. M.; Secker, P.: Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements. New York: John Wiley & Sons Inc., 1994, S. 88
- [20] Lewis, T. J.: The movement of electrical charge along polymer surface. in: Clark, D. T. und W. J. Feast (Eds.): Polymer Surfaces. New York: Wiley-Interscience, 1978, S. 67 - 89
- [21] Lewis, T. J.: Charge transport, charge injection and breakdown in polymeric insulators. J. Phys. D: Appl. Phys. 23 (1990), S. 1469 - 1478
- [22] Barnes, C.; Lederer, P. G.; Lewis, T. J.; Toomer, R.: Electron and ion transfer processes at insulator surfaces. Journal of Electrostatics 17 (1981), S. 107 - 114
- [23] Rudden, M. N.; Wilson, J.: Elementare Festkörperphysik und Halbleiterelektronik. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1995, S. 203
- [24] Finkelburg, W.: Einführung in die Atomphysik. 12. Auflage, Berlin: Springer Verlag, 1976, S. 457 - 499
- [25] Giber, J. et al.: Szilárdtestek felületfizikája. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1987, S. 137 - 141
- [26] Greason, W. D.: Investigation of a test methodology for triboelectrification. Journal of Electrostatics 49 (2000), S. 245 - 256
- [27] Davis, D. K.: Charge generation on dielectric surfaces. Brit. J. Appl. Phys., Ser. 4, 2 (1969), S. 1533 - 1537
- [28] Horowitz, G.: Physics of organic field-effect transistors. In: Hadziioannou, G. und P. F. van Hutten (Eds.): Semiconducting Polymers. Weinheim: Wiley-VCH, 2000, S. 463 - 511
- [29] Bauser, H.; Klöpfler, W. und H. Rabenhorst: On the charging mechanism of insulating solids. Advances in Static Electricity, Vol. 1, Proceedings of the 1<sup>st</sup> Int. Conf. In Static Electricity, Hofburg in Wien (Austria), (1970), S. 2 - 9

- 
- [30] Bauser, H.: Ladungsspeicherung in Elektronenhaftstellen in organischen Isolatoren. *Kunststoffe* 62 (1972) 3, S. 192 - 196
- [31] Krupp, H.: Physical models of the static electrification of solids. *Static Electrification, Conference Series Nr. 11*, London, (1971), S. 1 - 16
- [32] Taylor, D. M. und P. E. Secker: *Industrial Electrostatics: Fundamental and Measurements*. New York: John Wiley & Sons, 1994, S. 91 - 92
- [33] Bässler, H.: Der Ladungsübergang von Metall zum organischen Isolator als Primärschritt der elektrostatischen Aufladung. *Kunststoffe* 62 (1972) 2, S. 115 - 119
- [34] Chowdry, A.; Westgate, C. R.: The role of bulk traps in metal-insulator contact charging. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 7 (1974), S. 713 - 725
- [35] Lowell, J.; Rose-Innes, A. C.: Contact electrification. *Advances in Physics* 29 (1980) 6, S. 947 - 1023
- [36] Castle, G. S. P.: Contact Charging Between Insulators. *Journal of Electrostatics* 40&41 (1997), S. 13 - 20
- [37] Mizutani, T.; Takai, Y.; Osawa, T. und M. Leda: Barrier heights and surface states of metal-polymer (PET) contacts. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 9 (1976), S. 2253 - 2259
- [38] Anderson, J. H.: The effect of additives on the tribocharging of electrophotographic toners. *Journal of Electrostatics* 37 (1996), S. 197 - 209
- [39] Davis, D. K.: The generation and dissipation of static charge on dielectrics in a vacuum. *Proc. 2<sup>nd</sup> Conf. On Static Electrification, Inst. Phys. and Phys. Soc. Conf. Ser. 4* (1967), S. 29 - 36
- [40] Cunningham, R. G.; Hood, H. P.: The Relation between Contact Charging and Surface Potential Differences. *Journal of Colloid and Interface Science* 32 (1970) 3, S. 273 - 276
- [41] Davis, D. K.: Charge generation on solids. *Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Static Electrification, Wien, Österreich, 4.-5. Mai (1970)*, in: *Advances in Static Electricity 1* (1971), S. 10 - 21
- [42] Wählin, A.; Bäckström, G.: Sliding electrification of Teflon by metals. *Journal of Applied Physics* 45 (1974) 5, S. 2058 - 2064
- [43] O'Neill, B. C.; Foord, T. R.: Contact and tribo charging of polymer surfaces. *Proc. 4<sup>th</sup> Conference on Static Electrification, London (UK), Inst. Phys. Conf. Ser., Nr. 27* (1975), S. 104 - 114
- [44] Greason, W. D.; Iculet, I. I.: Insulator Work Function Determination from Contact Charging with Metals. *IEEE conference record of Annual Meeting of the Industry Applications Society New York, Band 10* (1975), S. 428 - 435

- 
- [45] Lowell, J.: The electrification of polymers by metals. J. Phys. D: Appl. Phys. 9 (1976) 11, S.1571-1585
- [46] Elsdon, R.; Mitchell, F. R. G.: Contact electrification of polymers. J. Phys. D: Appl. Phys. 9 (1976), S. 1445 - 1460
- [47] Lowell, J.: Surface states and the contact electrification of polymers. J. Phys. D: Appl. Phys. 10 (1977), S. 65 - 71
- [48] Murata, Y.; Hodoshima, T.; Kittaka, S.: Evidence for electron transfer as the mechanism of contact charging of polyethylene with metals. Japanese Journal of Applied Physics 18 (1979) 12, S. 2215 - 2220
- [49] Dervos, C.; Truscott, W. S.: Physical processes for contact charge transfer. Journal of Electrostatics 16 (1985), S. 137 - 146
- [50] Akande, A. R.; Lowell, J.: Contact electrification of polymers by metals. Journal of Electrostatics 16 (1985), S. 147 - 156
- [51] El-Kazzaz, A.; Rose-Innes, A. C.: Contact charging of insulators by liquid metals. Journal of Electrostatics 16 (1985), S. 157 - 163
- [52] Akande, A. R.; Lowell, J.: Charge transfer in metal/polymer contacts. J. Phys. D: Appl. Phys. 20 (1987), S. 565 - 578
- [53] Cunningham, S.: Measurement of the dynamics of multiple contact electrification of polymers by metal. Inst. Phys. Conf. Ser. No. 118: Section 4, Paper presented at Electrostatics '91, Oxford, (1991), S. 205 - 210
- [54] Follows, G. W.; Lowell, J.; Wilson, M. P. W.: Contact electrification of polyamides. Journal of Electrostatics 26 (1991), S. 261 - 273
- [55] Akande, A. R. und Adedoyin, J. A.: Correlation of charge transfer in metal/polymer contact with contact potential. Journal of Electrostatics 51&52 (2001), S. 105 - 110
- [56] Lowell, J.; Akande, A. R.: Contact electrification - why is it variable? J. Phys. D: Appl. Phys. 21 (1988), S. 125 - 137
- [57] Davies, D. K.: Contact charge transfer dynamics. IAS Annual Meeting, 1980. II, New York (USA): IEEE (1980), S. 1038 - 1041
- [58] Charlson, E. M.; Charlson, E. J.; Burkett, S.; Yasuda, H. K.: Study of the contact electrification of polymers using contact and separation current. IEEE Transactions on Electrical Insulation 27 (1992) 6, S. 1144 - 1151
- [59] Lee, L.-H.: Dual mechanism for metal-polymer contact electrification. Journal of Electrostatics 32 (1994), S. 1 - 29
- [60] Lowell, J.: Tunneling between metals and insulators and its role in contact electrification. J. Phys. D: Appl. Phys. 12 (1979), S. 1541 - 1554

- 
- [61] Henry, P. S. H.: The role of asymmetric rubbing in the generation of static electricity. *British Journal of Applied Physics Suppl. 2* (1957), S. S31 - S36
- [62] Shaw, P. E.: Electrical separation between identical solid surfaces. *Proc. The Physical Society Vol. 39. Part 5* (1927), S. 449 - 452
- [63] Lowell, J.; Truscott, W. S.: Triboelectrification of identical insulators: I. An experimental investigation. *J. Phys. D: Appl. Phys. 19* (1986), S. 1273 - 1280
- [64] Lowell, J.; Truscott, W. S.: Triboelectrification of identical insulators: II. Theory and further experiments. *J. Phys. D: Appl. Phys. 19* (1986), S. 1281 - 1298
- [65] Singh, S.; Hearn, G. L.: Development and application of an electrostatic microprobe. *Journal of Electrostatics 16* (1985), S. 353 - 361
- [66] Lowell, J.: Bidirectional charge transfer in repeated contacts to polymers. *Journal of Electrostatics 20* (1987), S. 233 - 238
- [67] Brück, R.: Chemische Konstitution und elektrostatische Eigenschaften von Polymeren. *Kunststoffe 71* (1981) 4, S. 234 - 239
- [68] Taylor, D. M.; Lewis, T. J.: Electrification of Polymers during Extrusion. *DECHEMA Monogr. 72* (1974), S. 125 - 136
- [69] Williams, M. W.: The dependence of triboelectric charging of polymers on their chemical composition. *J. Macromol. Sci. - Rev. Macromol. Chem. C14* (2) (1976), S. 251 - 265
- [70] Mizes, H. A.; Conwell, E. M.; Salamida, D. P.: Direct observation of ion transfer in contact charging between a metal and a polymer. *Appl. Phys. Lett. 56* (1990) 16, S. 1597 - 1599
- [71] Robins, E. S.; Rose-Innes, A. C.; Lowell, J.: Are adsorbed ions involved in the contact charging between metals and insulators? *Proc. 4th Conference on Static Electrification, London (UK), Inst. Phys. Conf. Ser., Nr. 27* (1975), S. 115 - 121
- [72] Robins, E. S.; Lowell, J.; Rose-Innes, A. C.: The role of surface ions in the contact electrification of insulators. *Journal of Electrostatics 8* (1980) 2-3, S. 153 - 160
- [73] Henniker, J.: Triboelectricity in Polymers. *Nature 196* (1962) 3, S. 474
- [74] Williams, M. W.: Effect of polymer structure on its triboelectric properties. *IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet., 9<sup>th</sup> Conf. Rec. Pittsburgh* (1974), S. 131 - 139
- [75] Löbel, W.: Elektrostatische Probleme bei Textilien. *Textiltechnik 26* (1976) 12, S. 778 - 782
- [76] Coehn, A.: Ueber ein Gesetz der Electricitätserregung. *Ann. d. Phys. u. Chem., Band 64* (1898), S. 217 - 232

- 
- [77] Coehn, A; Curs, A.: Studien zur Berührungselektrizität: Die Ladung von Metallen gegen Dielektrika. Zeitschrift für Physik, Band 29 (1924), S. 186 - 195
- [78] Bauch, H.: Meßplatz für die Bestimmung der Triboaufladung von Stäuben. 25. Sitzung des DECHEMA-Arbeitsausschusses „Elektrostatische Aufladung“ am 20.01.(1993)
- [79] Morris, W. T.: Static electrification of polymers. Review. Plast. Polym. 38 (1970) 133, S. 41 - 45
- [80] Lowell, J.; Brown, A.: Contact electrification of chemically modified surface. Journal of Electrostatics 21 (1988), S. 69 - 79
- [81] Lowell, J.: The relationship between contact charging and the concentration of donor impurities in polymers. J. Phys. D: Appl. Phys. 12 (1976), S. 2217 - 2222
- [82] Macholdt, H.-T.; Sieber, A.: Triboelectric charging properties of organic color pigments. Journal of Imaging Technology 14 (1988), S. 89 - 93
- [83] Murata, Y.; Aradachi, T.: Change in charging characteristics of polymer powder by plasma treatment. Journal of Electrostatics 51&52 (2001), S. 97 - 104
- [84] Gibson, H.W.: Control of electrical properties of polymers by chemical modification. Polymer 25 (1984) 1, S. 3 - 27
- [85] Gibson, H. W.; Bailey, F. C.; Mincer, J. L.; Gunther, W. H. H.: Control of triboelectric charging properties of polymers by chemical modification. J. of Polym. Sci.: Polym Chem. Ed. 17 (1979), S. 2961 - 2974
- [86] Uyama, Y.; Ikada, Y.: Electrostatic properties of UV-irradiated and surface-grafted polymers. Journal of Applied Polymer Science 41 (1990), S. 619 - 629
- [87] Shinohara, I.; Yamamoto, F.; Anzai, H.; Endo, S.: Chemical structure and electrostatic properties of polymers. Journal of Electrostatics 2 (1976), S. 99 - 110
- [88] Brönsted, J. N.: Einige Bemerkungen über den Begriff der Säuren und Basen. Rec. Trav. Chim. Pays-Bas. 42 (1923), S. 718 - 728
- [89] Lewis, G. N.: Valence and the structure of molecules. The Chemical Catalogue Corp., New York, 1923
- [90] Augsburg, A.: Untersuchungen von Zusammenhängen zwischen Oberflächen-polaritäts-Eigenschaften und dem elektrostatischen Aufladungsverhalten polymerer Festkörper. Dissertation, TU Dresden, 1999
- [91] Berndt, H.: Elektrostatik: Ursachen, Wirkungen, Schutzmaßnahmen, Messungen, Prüfungen, Normung. Berlin, Offenbach: VDE-VERLAG, 1998



- 
- [92] Schön, G.: Elektrostatische Aufladungsvorgänge und ihre Zündgefahren. In: Freytag, H. H. (Hrsg.): Handbuch der Raumexplosionen. 1. Auflage, Weinheim: Verlag Chemie GmbH, 1965
- [93] Zimmer, E.: Ein Beitrag zur elektrostatischen Aufladung von hochpolymeren Isolierstoffen. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1969
- [94] Sippel, A.: Die Bedeutung und Beseitigung der elektrostatischen Aufladung von Textilfasern. Melliand Textilberichte 35 (1954) 8, S. 831 - 835
- [95] Zimmerli, T.: Prüfung und Beurteilung des elektrostatischen Verhaltens von textilen Flächengebilden. Textilveredlung 16 (1981) 2, S. 68 - 72
- [96] Liesegang, J.; Senn, B. C.: Resistivity, charge diffusion and charge determinations on charged insulator surfaces. Journal of Applied Physics 80 (1996) 11, S. 6336 - 6339
- [97] von Szantho, E.: Über die elektrische Ladungen feinkörniger Stoffe beim Rieseln. Habilitation, Bergakademie Clausthal, 1948
- [98] Bailey, A. G.: Charging of solids and powders. Journal of Electrostatics 30 (1993), S. 167 - 180
- [99] Schubert, G.; Simon, F.; Németh, E.; Albrecht, V.: Beeinflussung der Kontaktaufladung von Kunststoffen durch Modifizierung ihrer Oberfläche. Forschungsbericht Sonderforschungsbereich 285, Teilprojekt B9, TU Bergakademie Freiberg, 2001
- [100] Drelich, J.; Miller, J. D.: A critical review of wetting and adhesion phenomena in the preparation of polymer-mineral composites. Mineral and Metallurgical Processing, Nov. (1995), S. 197 - 204
- [101] Jacobasch, H.-J.: Microgravimetrische Gassorptionsmessungen an Faserstoffen. Faserforschung und Textiltechnik 29 (1978) 3, S. 184 - 189
- [102] Coelho, M. C.; Harnby, N.: Moisture Bonding in Powders. Powder Technology 20 (1978), S. 201 - 205
- [103] Zimmer, E.: Die elektrostatische Aufladung von hochpolymeren Isolierstoffen. Kunststoffe 60 (1970) 7, S. 465 - 468
- [104] Pearse, M. J.; Hickey, T. J.: The separation of mixed plastics using a dry triboelectric technique. Resource Recovery and Conservation 3 (1978), S. 179 - 190
- [105] Yanar, D. K.; Kwetkus, B. A.: Electrostatic separation of polymer powders. Journal of Electrostatics 35 (1995), S. 257 - 266
- [106] Kwetkus, B. A.: Contact electrification of solids. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1992

- 
- [107] Duba, A. G.: Electrical conductivity of coal and char. *Fuel* 56 (1977), S. 441 - 443
- [108] Lüttgens, G.; Glor, M.: *Elektrostatische Aufladung begreifen und sicher beherrschen*. Ehningen bei Böblingen: expert-Verlag, 1993
- [109] Dankin, T. W.; Luxa, G.; Oppermann, G.; Vigreux, J.; Wind, G.; Winkelkemper, H.: Breakdown of gases in uniform fields, Paschen curves for nitrogen, air and sulfur hexafluoride. *Electra* 32 (1974), S. 61 - 71
- [110] Volland, R.: Electric conductivity of air. In: Landolt-Börnstein, New Series V/4b. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1988, S. 351 - 353
- [111] Kwetkus, B. A.; Sattler, K.; Siegmann, H.-C.: Gas breakdown in contact electrification. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 25 (1992), S. 139 - 146
- [112] Németh, E.: *Methodik der In-Stream-Ladungsmessung und ihre Anwendung zur Bestimmung der Aufladungskinetik*. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 1998
- [113] Lowell, J.: Charge accumulation by repeated contacts of metals to insulators. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 17 (1984), S. 1859 - 1870
- [114] Fuhrmann, J.; Hofmann, R.: Properties of injected charge carriers at intermittent and permanent polystyrene metal interfaces. *Proc. of the 1<sup>st</sup> Internat. Conf. on Cond. and Breakdown in Solid Dielectrics*, New York: IEEE (1983), S. 71 - 75
- [115] Cunningham, S.; Goodings, A.: Plastic deformation and the transfer of electrostatic charge between metals and polymers during repeated-contact experiments. *Journal of Electrostatics* 18 (1986), S. 103 - 108
- [116] Yu, Z.-Z.; Watson, P. K.: Contact charge accumulation and reversal on polystyrene and PTFE films upon repeated contact with mercury. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 22 (1989), S. 789 - 801
- [117] Lowell, J.: Constraints on contact charging of insulators: II. Energy constraints. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 19 (1986), S. 105 - 113
- [118] Coste, J.; Pechery, P.: Contribution to the study of charges generated by friction between metals and polymers. *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Static Electricity (Grenoble)*, Paris: Société de Chimie Industrielle Paris, (1977), S. 4a - 4f
- [119] Baur, R.; Macholdt, H.-T.: Charge control agents for triboelectric (friction) charging. *Journal of Electrostatics* 30 (1993), S. 213 - 222
- [120] Berecz, E.: *Általános kémia II*. Budapest: Tankönyvkiadó, 1976, S. 22
- [121] Kwetkus, B. A.; Gellert, B.; Sattler, K.: Discharge phenomena in contact electrification. *Inst. Phys. Conf. Ser. No. 118: Section 4*, Paper presented at *Electrostatics '91*, Oxford, (1991), S. 229 - 234

- 
- [122] Watson, P. K.; Yu, Z.-Z.: The contact electrification of polymers and the depth of charge penetration. *Journal of Electrostatics* 40&41 (1997), S. 67 - 72
- [123] Becker, G. W. und D. Braun (Hrsg.): *Kunststoff-Handbuch*, 2. Polyvinylchlorid. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1986, S. 273 - 280
- [124] Fraunhofer Institut für angewandte Polymerforschung: Oberflächenanalyse mit Röntgenphotoelektronenspektroskopie, Internet: [www.iap.fhg.de](http://www.iap.fhg.de), 19.12.(2001)
- [125] Woolam, A. J.; Johs, B.; Herzinger, C. M.; Hilfiker, J.; Synowicki, R.; Bungay, C. L.: Overview of variable angle spectroscopic ellipsometer (VASE); Part I: Basic Theory and typical applications. In: Al-Jumaily, G. A.: *Optical Metrology. Proceedings of the Conf. in Denver, Colorado, USA, 18-19. July (1999)*
- [126] Forschungszentrum Rossendorf: Ellipsometrie. Internet: [www.fr-rossendorf.de](http://www.fr-rossendorf.de), 06.01.(2002)
- [127] DIN IEC 93 (VDE 0303 Teil 30) - Prüfverfahren für Elektroisolierstoffe - Spezifischer Durchgangswiderstand und spezifischer Oberflächenwiderstand von festen, elektrisch isolierenden Werkstoffen. Dezember 1993
- [128] Dr. Mündörfer, B.: persönliche Mitteilung am Kunststoff-Zentrum in Leipzig, 05. Nov. 2001
- [129] Egner, C.: Dielektrische Eigenschaften von transkristallinen Schichten. Diplomarbeit, TU Darmstadt, 1998
- [130] Seminar der VDI-Bildungswerk GmbH: ESD – Schutz gegen Entladungen statischer Elektrizität. Stuttgart, 16-17. Nov. (1998)
- [131] Cychy, A. J.: Oberflächenleitfähigkeitsverhalten von technischem Polyethylen-terephthalat unter hoher elektrischer Feldbelastung. Dissertation, TU Clausthal, 1991
- [132] Schmiedel, H. (Hrsg.): *Handbuch der Kunststoffprüfung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1992, S. 185 - 208
- [133] Daire, A.: Improving the Repeatability of Ultra-High Resistance and Resistivity Measurements. White Paper, Keithley Instruments, Inc., Cleveland, Ohio (USA), (1998)
- [134] Yeager, J. und Hrusch-Tupta, M. A. (Eds.): *Low Level Measurements*. 5. Auflage, Keithley Instrument, Inc., Ohio (USA), 1998
- [135] Röhl, P.: Dispersive hopping transport of electrons in polyethylene. *Siemens Forsch.- und Entwicklung – Bericht* 14 (1985) 3, S. 104 - 113
- [136] Wolny, A.; Kazmierczak, W.: Triboelectrification in fluidised bed of polystyrene. *Chemical Engineering Science* 44 (1989) 11, S. 2607 - 2610

- 
- [137] Spange, S.; Vilsmeier, E.; Fischer, K.; Reuter, A.; Prause, S.; Zimmermann, Y.; Schmidt, Ch.: Empirical polarity parameters for various macromolecular and related materials. *Macromol. Rapid Commun.* 21 (2000), S. 643 - 659
- [138] Fischer, K.; Spange, S.: Empirical surface polarity parameters for native polysaccharides. *Macromol. Chem. Phys.* 201 (2000) 15, S. 1922 - 1929
- [139] Murata, Y.; Hodoshima, T.; Kittaka, S.: Evidence for electron transfer as the mechanism of contact charging of polyethylene with metals. *Japanese Journal of Applied Physics* 18 (1979) 12, S. 2215 - 2220
- [140] Heyl, G.: Zur Messung der Ladungsverteilung auf der Oberfläche und im Inneren von hochisolierenden Stoffen. *Kunststoffe* 60 (1970), S. 45 - 52
- [141] Rossner, M.: Messung einzelner Partikeln mittels influenzierter Ladung. *Staub* 52 (1992), S. 405 - 410
- [142] Smolders, A.; Baeyens, J.: Continuous monitoring of particulate emissions by means of triboelectric probe. *Powder* 9 (1992) 2, S. 123 - 127
- [143] Vercoulen, P. H. W.; Marijnissen, J. C. M.; Scarlett, B.: Measuring electric charge on individual aerosol particles. *J. of Aerosol Science* 26 (1995) 1, S. 797 - 798
- [144] Bobeth, W.: *Textile Faserstoffe*. 1. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1993, S. 233 - 319
- [145] Gibson, N.; Lloyd, F. C.: The incendivity of discharges from electrostatically charged plastics. *Br. J. Appl. Phys.* 16 (1965), S. 1619 - 1631
- [146] Gibson, N.; Harper, D. J.: Evaluation of electrostatic hazards associated with non conducting materials. *Journal of Electrostatics* 11 (1981), S. 27 - 41
- [147] Reh, L.: *Wirbelschichtreaktoren für nichtkatalytische Reaktionen*. Ullmans Enzyklopädie der technischen Chemie, 4. Auflage, Band 3, Weinheim: Verlag Chemie, 1973, S. 433 - 460
- [148] Michel, W.: *Wirbelschichttechnik in der Energiewirtschaft*. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1992
- [149] Heschel, W.: *Gas-Feststoff-Systeme*. Vorlesungsmanuskript, TU Bergakademie Freiberg, (1997)
- [150] Subramenian, D.; Martin, H. und E. U. Schlünder: Stoffübertragung zwischen Gas und Feststoff in Wirbelschichten. *Verfahrenstechnik* 11 (1977) 12, S. 748 - 750
- [151] VDI Wärmeatlas. Hrsg.: VDI – Gesellschaft für Verfahrenstechnik & Chemieingenieurwesen, 7. Auflage, Düsseldorf: VDI Verlag, 1994, S. Db16
- [152] Orbádovics, J. Gy.: *Valószínűségyszámítás és matematikai statisztika*. Budapest: Scolar Kiadó, 1997, S. 180

- [153] Terris, B. D.; Stern, J. E.; Rugar, D.; Mamin, H. J.: Contact electrification using force microscopy. Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 24, S. 2669 - 2672
- [154] Heidberg, J.; Wiesner, S.: Effect of water adsorption on the ion mobility on the NaCl(100) cleavage structure as revealed by atomic force microscopy. Kali und Steinsalz 12 (1999) 9, S. 13 - 17
- [155] Brauser, H.: Ladungsspeicherung in Elektronenhaftstellen in organischen Isolatoren. Kunststoffe 62 (1972) 3, S. 192 - 196
- [156] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik. 16. Auflage, Leipzig: Fachbuchverlag, 1996

# Anlagen

## Anlage 1

### Existenzbereich der Wirbelschicht für die Versuchsmaterialien, berechnet nach dem Reh'schen Zustandsdiagramm

Das Zustandsdiagramm nach *Reh* [147] wird zur Beschreibung von Gas-Feststoff-Systemen verwendet. Es dient auch der strömungsmechanischen Auslegung von Wirbelschichten. Die hier vorgelegte Berechnung erfolgte in Anlehnung an [148], [149] und [150].

Auf der Abszisse des Diagramms ist die Reynolds-Zahl aufgetragen (**Bild 101**). Die Ordinate charakterisiert den reziproken Widerstandswert der Einzelteilchen. Im Diagramm sind die Linien bei konstanter Archimedes-Zahl und bei konstanter Beranek-Zahl aufgetragen. Der Existenzbereich der Wirbelschicht liegt zwischen der Austragslinie und der Wirbelpunktlinie.

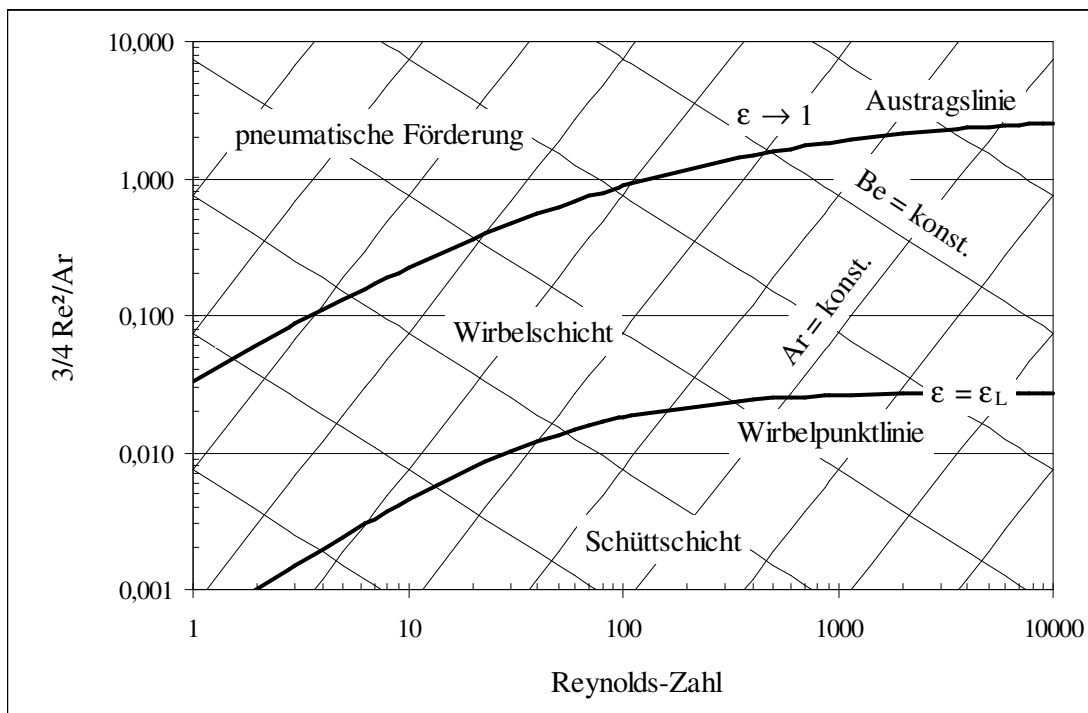


Bild 101: Zustandsdiagramm nach Reh [147]

Die **Wirbelpunktlinie** (Minimalfluidisierung) wird unter Anwendung der Widerstandsfunktion von *Ergun* berechnet:

$$\frac{3}{4} \frac{\text{Re}^2}{\text{Ar}} = \frac{3}{4} \frac{\epsilon_L^3}{\xi_p}, \quad (29)$$

wo  $\xi_p$  die Widerstandsfunktion nach Ergun darstellt, die im gesamten Reynolds-Zahl-Bereich anwendbar ist. Sie ist zu berechnen mit der Gleichung:

$$\xi_p = \frac{150(1-\varepsilon_L)}{Re} + 1,75 \quad (30)$$

Die Porosität der Schüttung am Lockerungspunkt wird nach der Beziehung von *Wen/Yu*

$$\frac{1-\varepsilon_L}{\varepsilon_L^3} \approx 11\Psi^2 \quad \text{ermittelt,} \quad (31)$$

wo  $\Psi$  die Sphärizität nach *Waddel* ist. Die Sphärizität der Teilchen ergibt sich wie folgt:

$$\Psi = \frac{d_{s,A}}{d_v} \quad (32)$$

Für den spezifischen oberflächenäquivalenten Kugeldurchmesser  $d_{s,A}$  und den volumenäquivalenten Kugeldurchmesser  $d_v$  lauten die Berechnungsformeln:

$$d_{s,A} = 6 \frac{V_P}{A_P} \quad \text{bzw.} \quad (33)$$

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{6V_P}{\pi}} \quad (34)$$

Die **Austragslinie** kann nach der Beziehung von *Martin* [150] beschrieben werden:

$$\frac{3}{4} \frac{Re^3}{Ar} = \frac{\frac{3}{4} Re^2}{81 \left[ \left( 1 + \sqrt{\frac{Re}{18}} \right)^2 - 1 \right]^2} \quad (35)$$

Um den Existenzbereich der Wirbelschicht für die Versuchsmaterialien zu ermitteln, wurde die Archimedes-Zahl für die Teilchen berechnet und in den entsprechenden Diagrammen eingetragen:

$$Ar = \frac{d_{s,A}^3 \cdot g}{v_L^2} \cdot \frac{\rho_P - \rho_L}{\rho_L} \quad (36)$$

Die Abszissen-Werte für  $Re_L$  bzw.  $Re_A$  an den Schnittpunkten mit der Wirbelpunktlinie bzw. der Austragslinie wurden abgelesen und daraus die Lockerungsgeschwindigkeit  $w_L$  und die Austragsgeschwindigkeit  $w_A$  wie folgt ermittelt:

$$w_L = \frac{Re_L \cdot v_L}{d_{s,A}} \quad \text{bzw.} \quad (37)$$

$$w_A = \frac{Re_A \cdot v_L}{d_{s,A}} \quad (38)$$

Die Zustandsdiagramme nach Reh sind in den **Bildern 102 bis 111** dargestellt. Als Arbeitspunkt der Wirbelschicht wurde eine Strömungsgeschwindigkeit des Wirbelmediums von  $w = 5 \text{ m/s}$  gewählt.

Die ermittelten Kennwerte für die Versuchsmaterialien sind in **Tabelle 14** und **15** zusammengefasst. Die Kennwerte in der Wirbelschicht beziehen sich auf eine Lufttemperatur von  $t = 25 \text{ °C}$  und einen Luftdruck von  $p_L = 101,3 \text{ kPa}$ . Es wurde mit  $\rho_L = 1,184 \text{ kg/m}^3$  und  $v_L = 1,650 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  gerechnet [151].

Tabelle 14: Geometrische Kennwerte der Versuchsmaterialien

Material	$V_p$ in $10^{-9} \text{ m}^3$	$A_p$ in $10^{-6} \text{ m}^2$	$d_{s,A}$ in $10^{-3} \text{ m}$	$d_v$ in $10^{-3} \text{ m}$	$\Psi$
PE	41,5	68,7	3,62	4,30	0,84
PP	31,6	48,4	3,92	3,92	1,00
PB	22,1	38,1	3,48	3,48	1,00
PMP	16,3	35,9	2,73	3,15	0,87
PA	20,3	42,5	2,86	3,38	0,85
PS	16,4	36,0	2,74	3,15	0,87
PVC	34,2	76,4	2,69	4,03	0,67
PET	12,0	29,2	2,47	2,84	0,87
POM	16,1	30,9	3,14	3,14	1,00
PMMA	14,8	36,2	2,46	3,05	0,81

Tabelle 15: Kennwerte der Versuchsmaterialien in der Wirbelschicht

Material	$\epsilon_L$	Ar	$Re_L$	$Re_A$	$w_L$ in m/s	$w_A$ in m/s
PE	0,42	$1,33 \cdot 10^6$	210	1920	1,0	8,7
PP	0,38	$1,60 \cdot 10^6$	197	2157	0,8	9,1
PB	0,38	$1,15 \cdot 10^6$	163	1800	0,8	8,5
PMP	0,41	$5,12 \cdot 10^5$	120	1150	0,7	7,0
PA	0,42	$7,19 \cdot 10^5$	120	1380	0,8	8,0
PS	0,41	$6,61 \cdot 10^5$	143	1330	0,9	8,0
PVC	0,47	$7,77 \cdot 10^5$	192	1450	1,2	8,9
PET	0,41	$6,44 \cdot 10^5$	135	1310	0,9	8,7
POM	0,38	$1,32 \cdot 10^6$	163	1920	0,9	10,1
PMMA	0,43	$5,31 \cdot 10^5$	130	1170	0,9	7,9



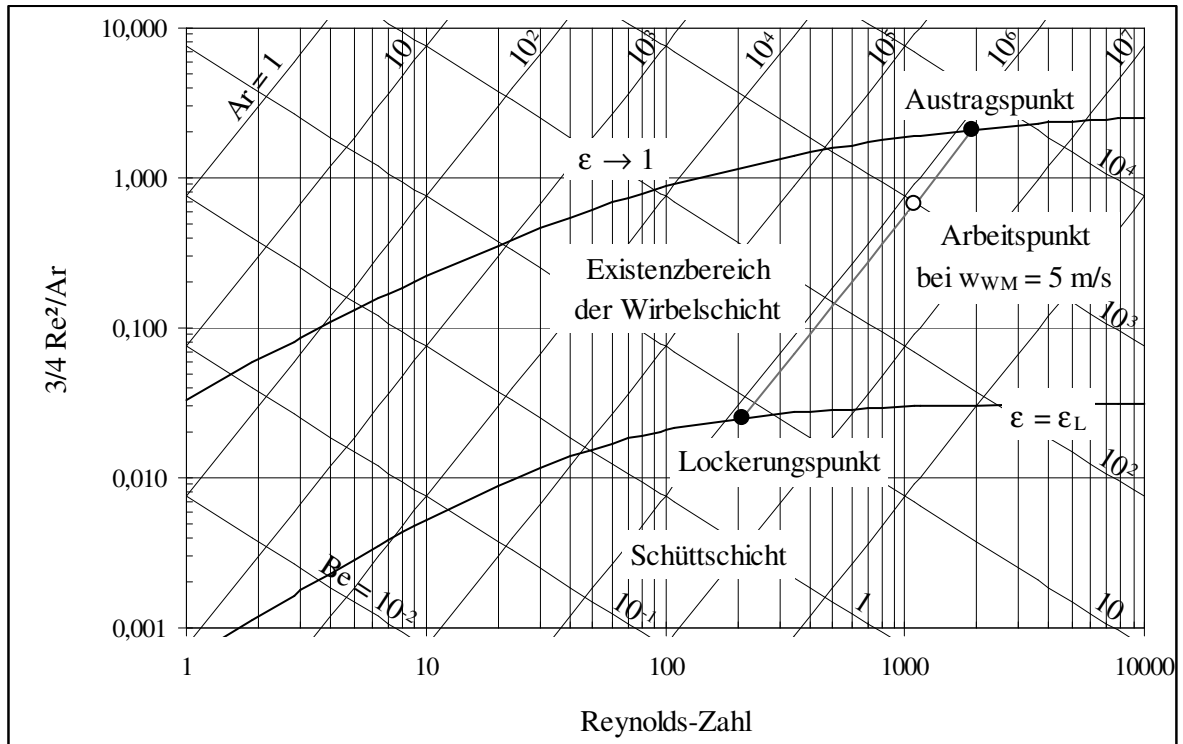


Bild 102: Zustandsdiagramm nach Reh für PE

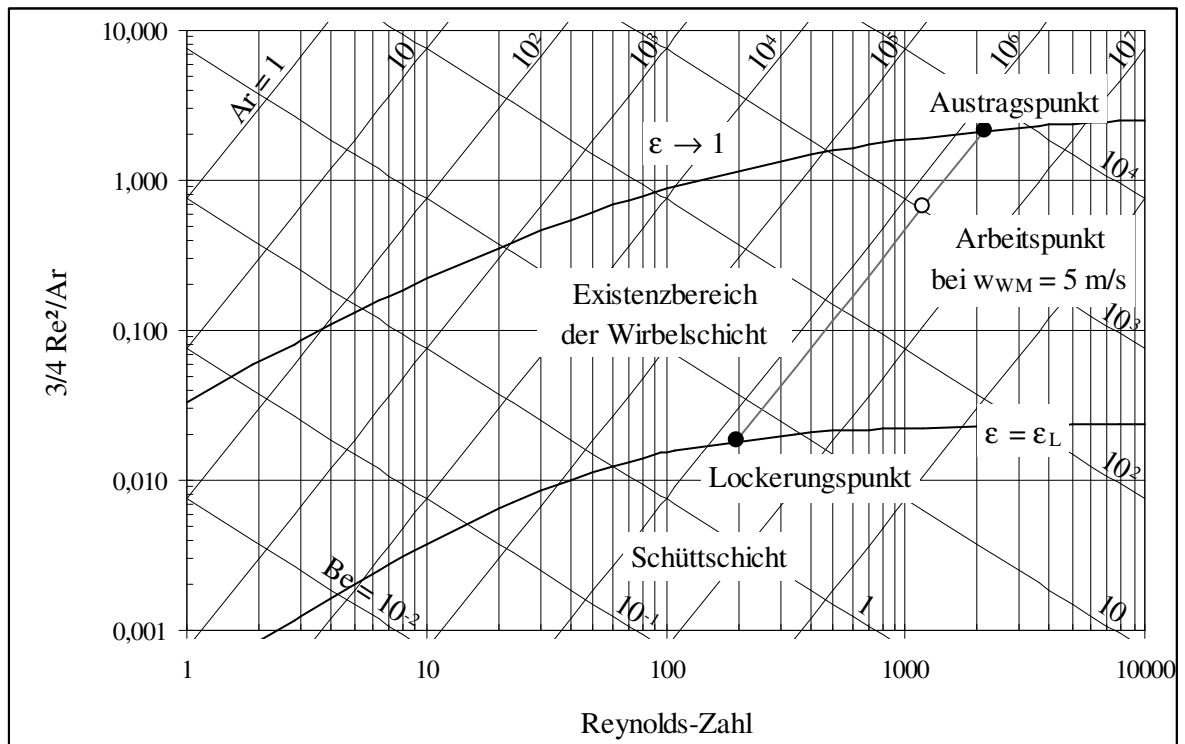


Bild 103: Zustandsdiagramm nach Reh für PP

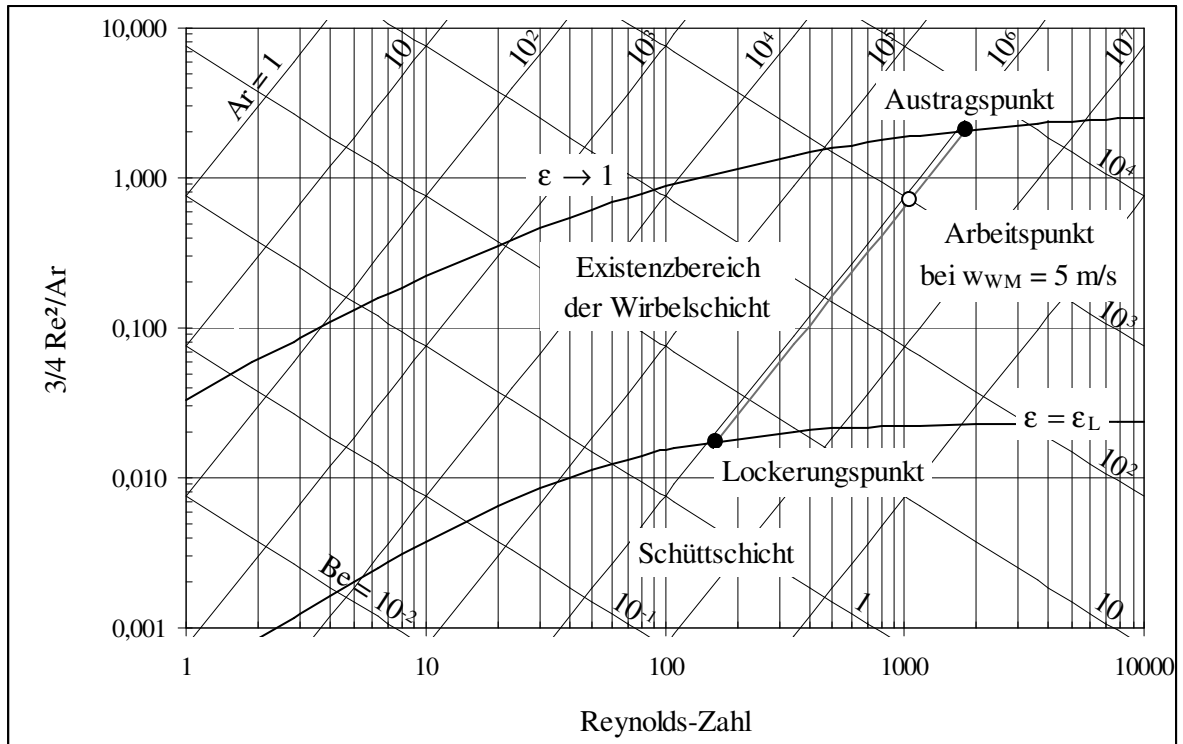


Bild 104: Zustandsdiagramm nach Reh für PB

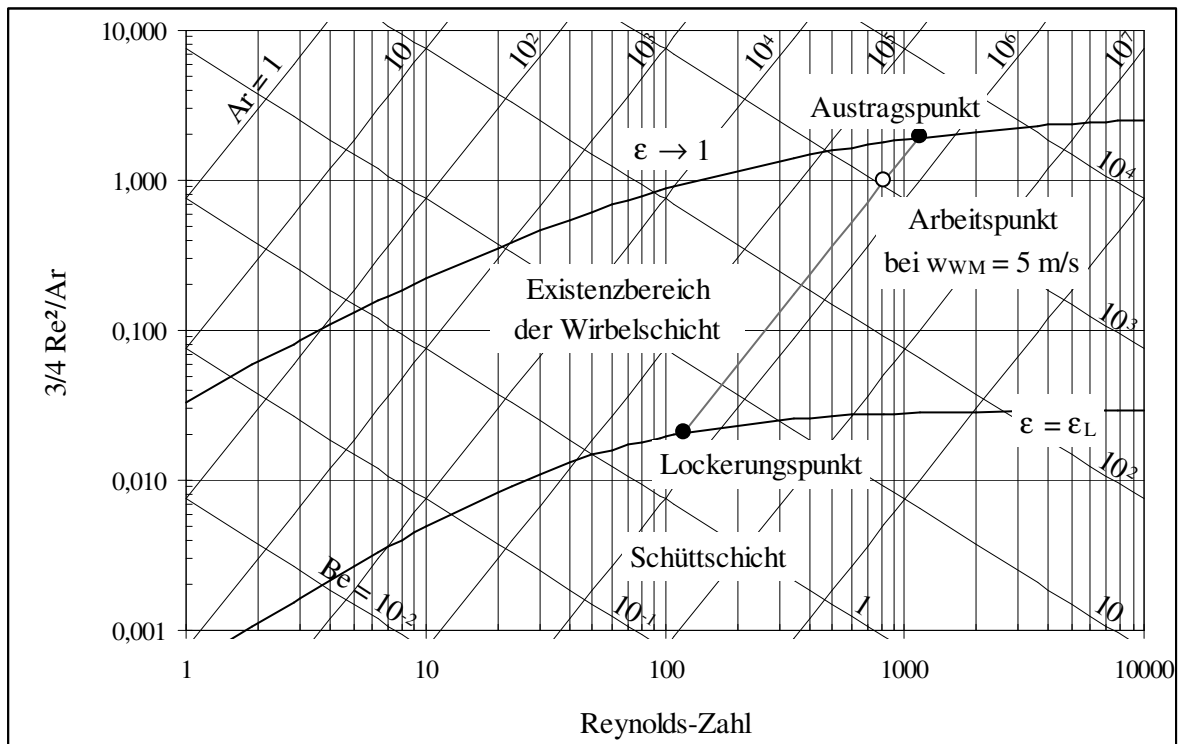


Bild 105: Zustandsdiagramm nach Reh für PMP

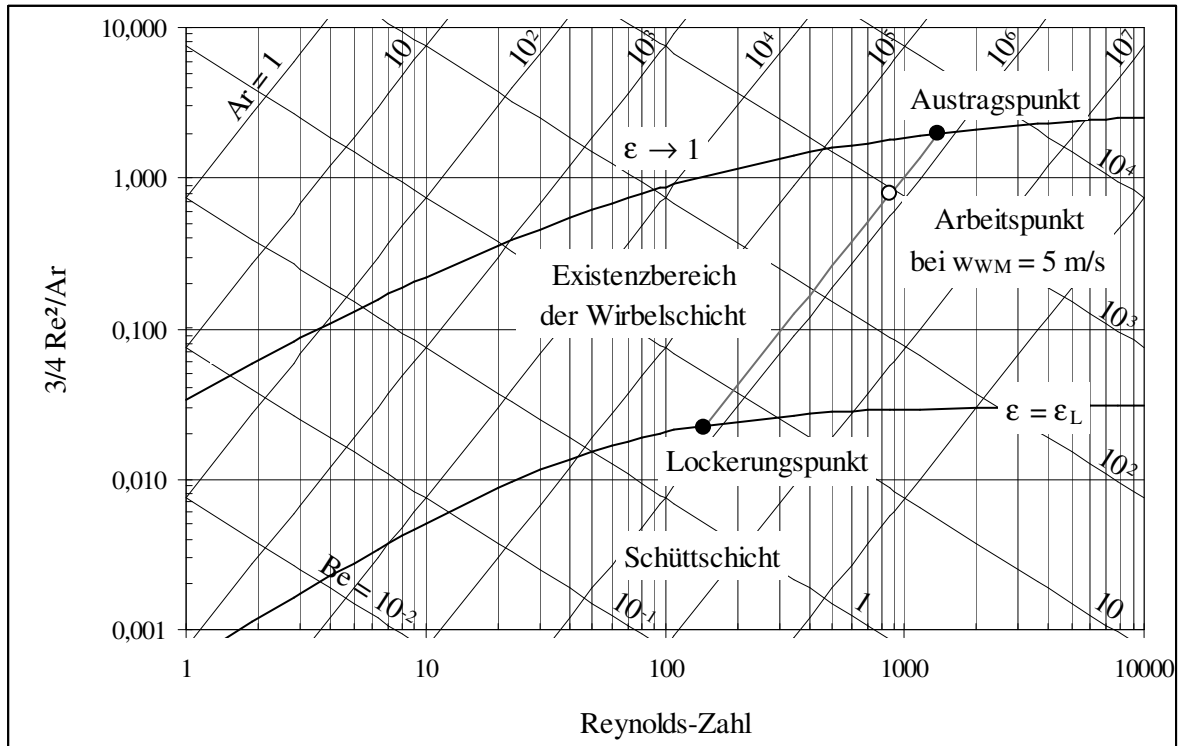


Bild 106: Zustandsdiagramm nach Reh für PA

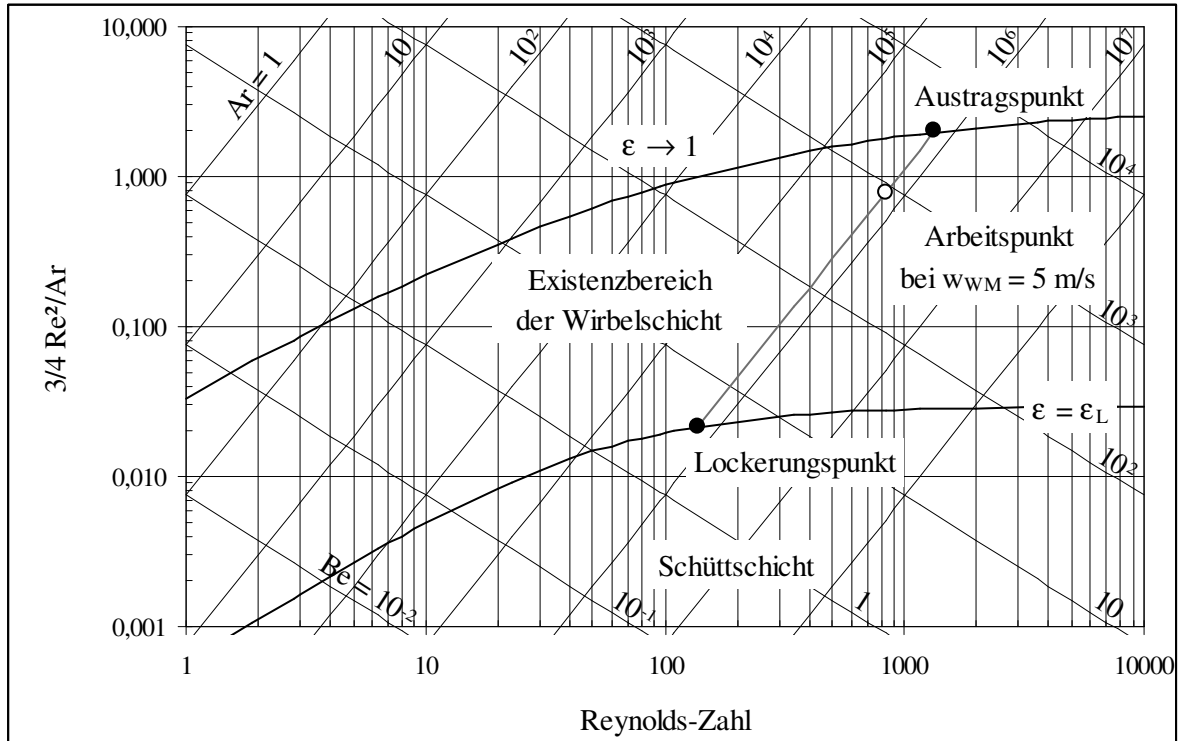


Bild 107: Zustandsdiagramm nach Reh für PS

-132-

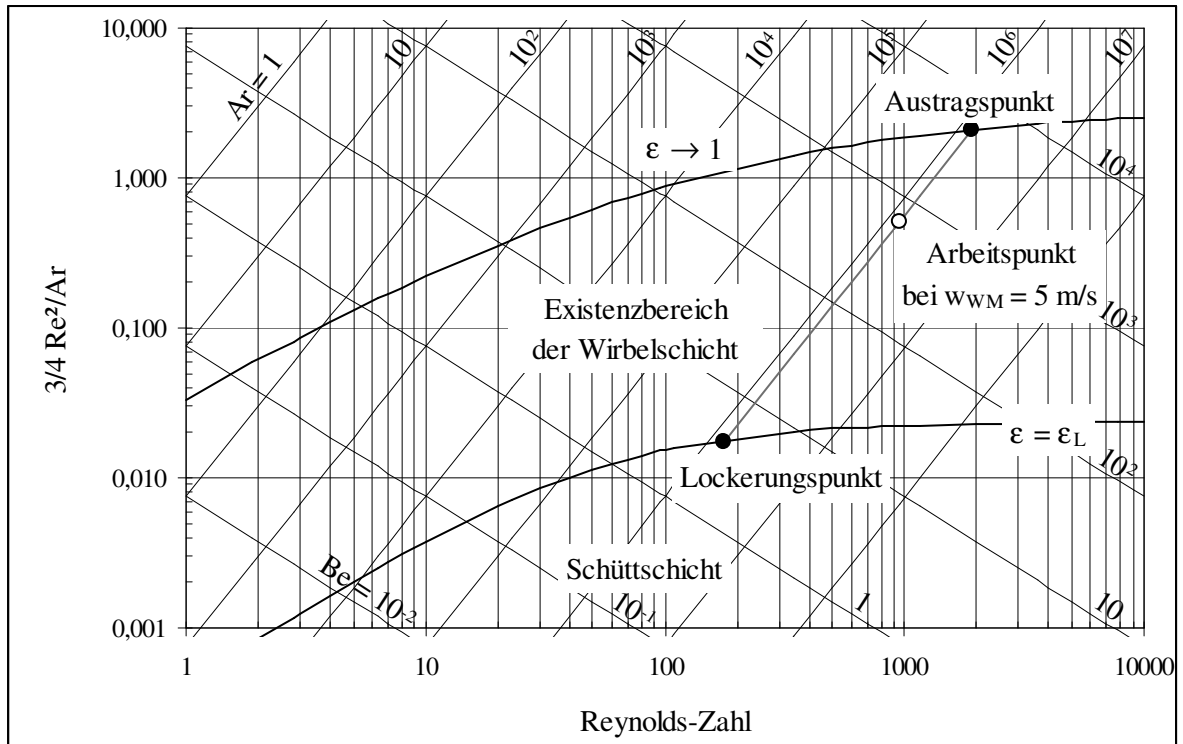


Bild 110: Zustandsdiagramm nach Reh für POM

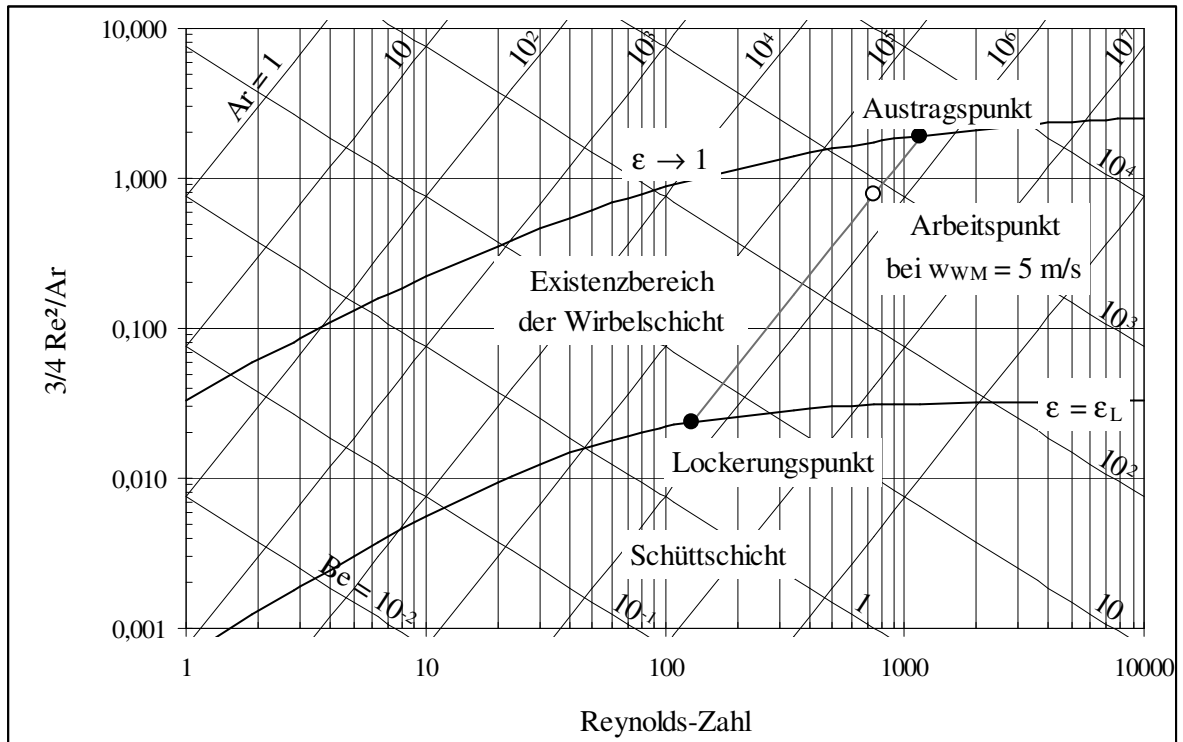


Bild 111: Zustandsdiagramm nach Reh für PMMA

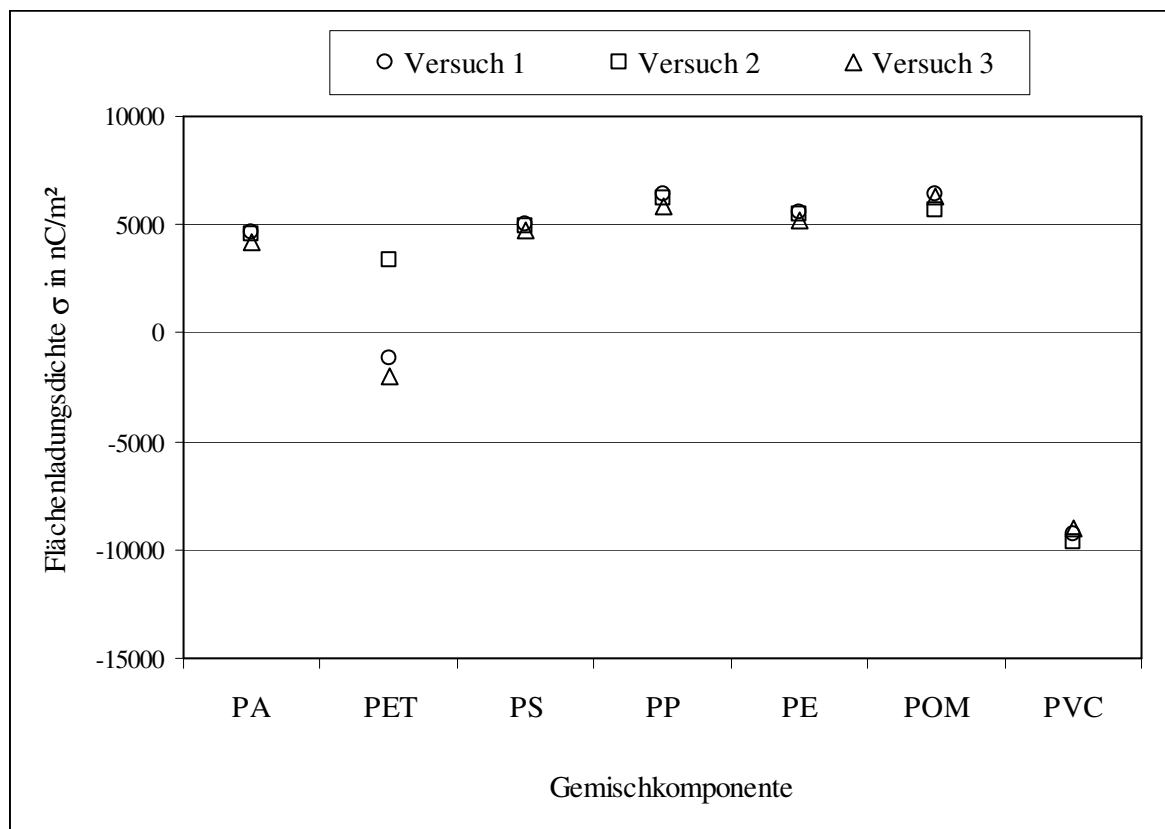
**Anlage 2**

Bild 112: Wiederholungsversuche mit einem 7-Komponenten-Gemisch

Aufladungseinheit: Wirbelschichtapparatur mit goldbeschichteter Wirbelkammerwandung